



**Уральский
федеральный
университет**

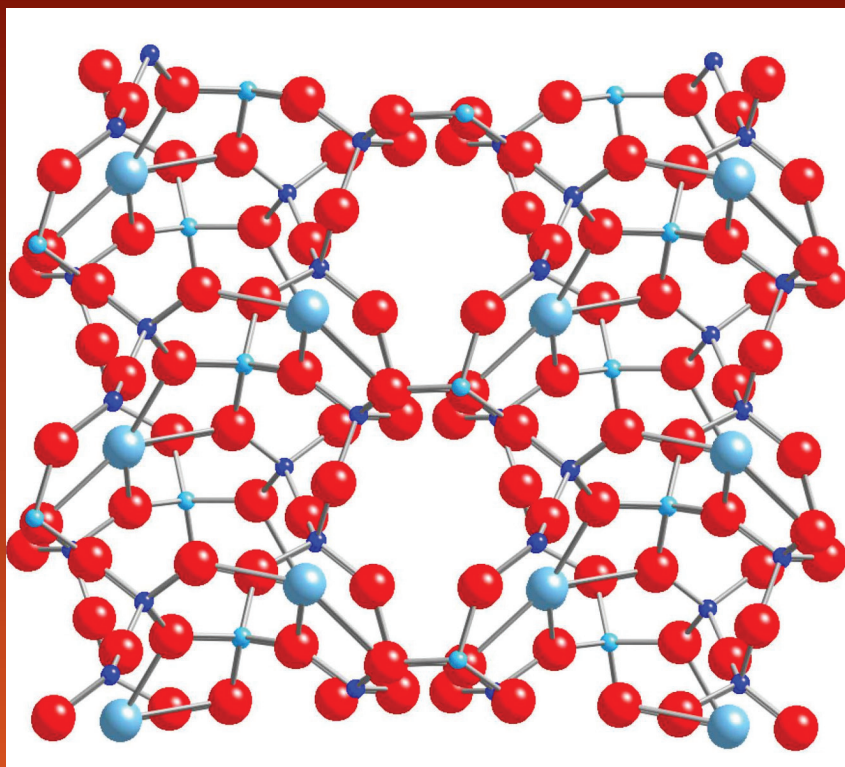
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

**Институт новых материалов
и технологий**

**М. А. ФИЛИППОВ
О. Ю. ШЕШУКОВ**

ТРЕНИЕ И АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебное пособие



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

М. А. Филиппов, О. Ю. Шешуков

ТРЕНИЕ И АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся
по направлениям подготовки

22.03.01, 22.04.01 — Материаловедение и технологии материалов
и 22.03.02, 22.04.02 — Металлургия

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2021

УДК 621.893(075.8)
ББК 34.41я73+34.35я73
Ф53

Рецензенты:

проф., д-р техн. наук *Б. Н. Гузанов* (заведующий кафедрой инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии Российского государственного профессионально-педагогического университета (РГППУ));

проф., д-р техн. наук *Б. А. Потехин* (кафедра «Технология металлов» Уральского государственного лесотехнического университета)

Научный редактор проф., д-р техн. наук *В. П. Швейкин*

Филиппов, М. А.

Ф53 Трение и антифрикционные материалы : учебное пособие / М. А. Филиппов, О. Ю. Шешуков ; М-во науки и высш. образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. — 204 с.

ISBN 978-5-7996-3389-9

Рассмотрены основные виды и механизмы трения и изнашивания. С позиций современных представлений описаны физико-химические свойства поверхностей трения деталей, условия их контактного взаимодействия. Проанализированы виды трения, основные виды повреждений рабочих поверхностей и обусловленные ими механизмы трения и изнашивания. Обоснованы требования, предъявляемые к антифрикционным материалам, и описаны основные классы антифрикционных материалов.

Кратко рассмотрены распространенные типы лабораторных установок для изучения трения и изнашивания металлов. Приведены тесты текущего контроля знаний по разновидностям трения, видам механического изнашивания и взаимосвязи структуры со свойствами основных антифрикционных и износостойких материалов.

Предназначено для студентов-бакалавров, магистров и аспирантов металлургических и машиностроительных специальностей вузов. Может быть полезно инженерно-техническим работникам предприятий и научно-исследовательских институтов.

Библиогр.: 17 назв. Табл. 24. Рис. 59.

УДК 621.893(075.8)
ББК 34.41я73+34.35я73

ISBN 978-5-7996-3389-9

© Уральский федеральный
университет, 2021

Оглавление

.....

Введение	5
1. Общие закономерности трения и изнашивания	8
1.1. Внешнее трение твердых тел.....	8
1.2. Изнашивание металлов при трении	13
2. Классификация и характеристика видов и механизмов изнашивания	25
2.1. Абразивное изнашивание	28
2.2. Эрозионное изнашивание	37
2.3. Кавитационное изнашивание.....	40
2.4. Усталостное изнашивание	44
2.5. Изнашивание при схватывании и заедании.....	50
2.6. Окислительное изнашивание	53
2.7. Водородное изнашивание.....	60
2.8. Изнашивание при фреттинг-коррозии	62
3. Процессы, происходящие на поверхностях трения, и механизмы изнашивания и разрушения.....	69
3.1. Кинетика процессов изнашивания	69
3.2. Структурные превращения металлов при трении.....	72
Изменения, вызванные деформацией при трении.....	76
3.3. Виды нарушения фрикционных связей поверхностей трения	85
3.4. Механизмы изнашивания и разрушения при трении	87
3.5. Эффект безызносности (избирательный перенос при трении)	91
3.5.1. Сущность эффекта безызносности	91
3.5.2. Реализация эффекта безызносности.....	100
4. Антифрикционные материалы на основе цветных металлов	103
4.1. Принципы выбора антифрикционных материалов.....	105
4.2. Баббиты	107

4.3. Сплавы меди	110
4.3.1. Бронзы.....	110
4.3.2. Латунь	129
4.4. Антифрикционные сплавы и припой.....	143
4.5. Алюминиевые сплавы	144
4.6. Сплавы на цинковой основе	149
 5. Антифрикционные сплавы на основе железа, металлокерамические и неметаллические материалы	 152
5.1. Антифрикционные чугуны	152
5.2. Графитизированные стали.....	167
5.3. Металлокерамические и неметаллические материалы.....	169
 Библиографический список	 174
 Приложение. Контрольные тесты по трению, износу и антифрикционным материалам	 176

Введение

.....

Трение — всеобщее явление живой и неживой природы. Справедливо утверждение, что без трения нельзя ступить ни шагу. Поверхности двух тел, вступающие в контакт, испытывают трение. Человечество более 5 тыс. лет назад научилось использовать трение для получения огня, а впоследствии — в других целях, но до настоящего времени многие стороны этого явления остаются плохо изученными. Это вызвано тем, что при трении одновременно происходят механические, физические, химические, электрические, тепловые, вибрационные и другие процессы, которые быстро протекают в очень тонких поверхностных слоях контактирующих тел и трудно поддаются изучению.

Работа любого механизма и машины связана с передачей энергии и потерями части передаваемой энергии на трение. Процесс трения, сопровождаемый различными воздействиями, вызывает изнашивание поверхности материалов. Можно сказать, что всё, что испытывает трение, изнашивается, несмотря на впечатляющие успехи триботехники в создании безызносных узлов трения, — исключения лишь подтверждают правило. Далеко не все, что изношено, может быть восстановлено.

Износ (изнашивание) — это изменение размеров, формы, массы или состояния поверхностного слоя твердого тела под влиянием внешней среды. Износ может вызываться трением поверхностей деталей машин одна о другую, воздействием на поверхность рабочей среды потоков жидкости, газа или контакта поверхности с твердыми частицами.

Повышение эксплуатационной стойкости деталей и узлов из металлических сплавов — одна из важнейших научно-технических задач, определяющих развитие новых и специальных отраслей машиностроения и других отраслей современной техники, которые предъявляют высокие требования к выбору материала рабочих органов машин и механизмов. В большинстве случаев такие детали или узлы работа-

ют в контакте с твердыми, жидкими или газообразными средами, рабочие поверхности которых подвергаются действию трения, а следовательно, механическому изнашиванию.

В мире и в России 80–90 % машин — автомобилей, самолетов, локомотивов, станков — преждевременно выходят из строя не вследствие поломок, а в результате недопустимого изменения размеров, формы или состояния рабочих поверхностей из-за трения и износа контактирующих деталей при работе любого механизма и агрегата машины.

Наиболее распространенным видом механического изнашивания, которому подвержены машины и агрегаты горнодобывающей, строительной-дорожной техники и транспорта, является абразивное изнашивание и его разновидности — газо- и гидроабразивное изнашивание. В то же время любые пары трения в закрытых механизмах — автомобилях, станках, приборах — подвержены адгезионному и усталостному изнашиванию. Разработка новых износостойких материалов и методов борьбы с этими видами изнашивания остается одной из важнейших проблем материаловедения.

Авторы представили данный учебный материал, придерживаясь традиций Уральской школы металловедения и используя многолетний опыт чтения соответствующих дисциплин материаловедческого цикла на металлургическом факультете, а в последние 10 лет — Институте новых материалов и технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Использовали многие важные положения из классических монографий, справочников и учебников по вопросам трения и изнашивания Ф. П. Боудена и Д. Тейбора, М. М. Хрущева, И. В. Крагельского, Б. И. Костецкого, Д. В. Конвисарова, В. Д. Кузнецова, Б. В. Дерягина, И. М. Любарского и Л. С. Палатника, Д. Н. Гаркунова, Э. Д. Брауна, Н. А. Буше, Р. М. Матвеевского, А. В. Чичинадзе, Д. Мура, Д. Бакли, А. С. Ахматова, А. В. Белого, Л. Г. Коршунова и др. При этом основные разделы из работ наших коллег были заимствованы, преимущественно такие, которые относятся к металловедческим аспектам фрикционного взаимодействия трущихся поверхностей и принципам выбора износостойких материалов, с учетом основного постулата металловедения: «состав материала — технология его получения и обработки — формирующаяся вторичная микроструктура рабочей поверхности при эксплуатации — износостойкость при данном виде контактного воздействия на поверхность». Кроме того, наука о трении и износе не стоит

на месте, появляются новые возможности и результаты исследований с применением современных методик и их теоретическая проработка, равно как непрерывно возрастает информационное поле Интернета, значимые сведения из которого приведены в данном учебном пособии. Особое внимание уделено протеканию фазовых превращений в метастабильных структурах тонких поверхностных слоев рабочих поверхностей при трении: образование неравновесных структурных составляющих — аустенита трения, мартенсита трения, применению и развитию предложенного нашим учителем И. Н. Богачевым принципа метастабильности аустенита при выборе износостойких материалов. Описаны результаты изучения условий формирования, строения и роли нанокристаллической структуры в процессах трения.

Формирование специфической структуры поверхностей трения и изнашивания описывается с позиций дислокационной теории. В основе описания структурных изменений лежит представление об образовании на контактирующих поверхностях металлической пленки с особыми свойствами, формированием границы раздела между поверхностной пленкой и основным металлом и диффузионным перераспределением дефектов металлов по толщине зоны деформации. Обсуждается проблема защитной роли вторичных структур с высокой прочностью, теплостойкостью, способствующих развитию нормального изнашивания.

Исходя из положения о неадекватности стандартных механических характеристик в отношении возможности суждения об износостойкости при трении, развивается концепция о прочности поверхности как решающем условии обеспечения высокой износостойкости. При этом определяющее значение отводится способности металла к упрочнению под воздействием фрикционных нагрузок. Подчеркивается важная роль деформационных мартенситных превращений в обеспечении высокой способности к упрочнению контактной поверхности в сочетании с возможностью релаксации напряжений в процессе образования кристаллов мартенсита деформации. Развито представление об эффективной твердости как адекватном критерию износостойкости металлических материалов с разным типом структуры. Эффективная твердость рассмотрена как комплексная характеристика, учитывающая не только исходную прочность металлов, но также и упрочнение, обусловленное деформационным превращением и структурными превращениями при фрикционном воздействии.

1. Общие закономерности трения и изнашивания

.....

1.1. Внешнее трение твердых тел

Внешнее трение — явление сопротивления относительно перемещению, возникающему между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии (ГОСТ 23.002–78).

Мерой трения является сопротивление трения, уравновешенное равнодействующей силой контакта при перемещении одного тела относительно другого.

Противодействие силам сцепления имеет место при внутреннем трении в процессе взаимного перемещения элементов структуры какого-нибудь тела (газа, жидкости, твердого тела) или при внешнем трении, когда при контакте поверхностей двух тел эти неровности срезаются, упруго или пластически деформируются. Противодействие силам адгезии двух контактирующих поверхностей тел начинается при попытке их взаимного перемещения. **Адгезия** — это поверхностное явление, заключающееся в сцеплении поверхностей в результате воздействия, в частности, поля сил.

Поле сил создается зарядом атомов (ионов, молекул), из которых состоит верхний слой контактирующих между собой тел. Данное поле экспоненциально уменьшается с увеличением расстояния от поверхности. Практически поверхностное взаимодействие типа ван-дер-ваальсова исчезает на расстоянии 1–2 нм, поэтому для адгезии необходимо соответствующее сближение поверхностей.

Адгезия и когезия вызываются одними и теми же силами, различие заключается в их локализации. Если силы действуют внутри тела, то вызывают когезию, если действуют на поверхности — адгезию

(рис. 1.1). Силы адгезии тем больше, чем больше воздействие электростатических и электродинамических сил в зоне контакта тел. Это тесно связано со структурой тел и, следовательно, их поверхности. Характер сил адгезии аддитивный, поэтому чем больше реальная поверхность контакта, тем прочнее адгезионное сцепление.

Всякое воздействие, приводящее к отрыванию элементов тела, встречает сопротивление когезионных сил, а отрывание или взаимное перемещение тел, соприкасающихся между собой, встречает сопротивление адгезионных сил.

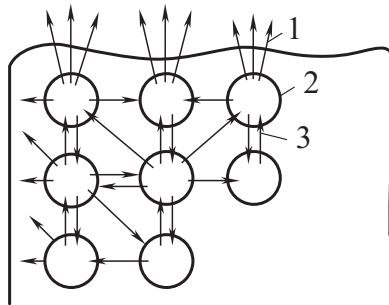


Рис. 1.1. Силы адгезии (1) и когезии (3) и элементы строения тела (атомы, ионы, молекулы) (2)

При взаимном перемещении тел с идеально гладкими поверхностями существовало бы только сопротивление адгезионных сил. Взаимное перемещение реальных шероховатых поверхностей контакта встречает не только адгезионное сопротивление, но и сопротивление неровностей обеих поверхностей, возникающее в результате упругих и пластических деформаций, срезания неровностей, царапания и т. д. Все эти воздействия уравниваются силами сцепления при декогезии материала. Итак, трение является следствием действия сил адгезии и когезии.

Виды трения

Важным является не только деление трения на внешнее и внутреннее, но и деление трения на сухое, граничное и жидкостное (рис. 1.2).

Трение без смазки (**сухое трение**) происходит при отсутствии на поверхностях трения обоих твердых тел смазочного материала всех видов.

Для снижения внешнего трения трущиеся поверхности разделяются слоем смазывающего вещества, при этом сухое трение тел заменяется **жидкостным трением**, или внутренним трением смазывающего вещества. Жидкостное трение возникает между двумя телами, полностью разделенными слоем жидкости (смазки). Отсутствие контакта между поверхностями предохраняет их от разрушения.

Если из-за большого давления слой смазки выдавливается из пространства между трущимися поверхностями, то между ними образуется тонкий слой смазочного материала, сохраняющийся там только в результате взаимодействия жидкости с твердыми телами. Такой слой называется **граничной пленкой смазки**. Чем сильнее взаимодействие, тем прочнее граничная пленка. Она не допускает возникновения сухого трения. Трение при наличии пленки граничной смазки называется **граничным трением**. Граничное трение двух твердых тел возникает при тонком слое смазки на поверхностях трения, не превышающем высоты шероховатостей соприкасающихся поверхностей.

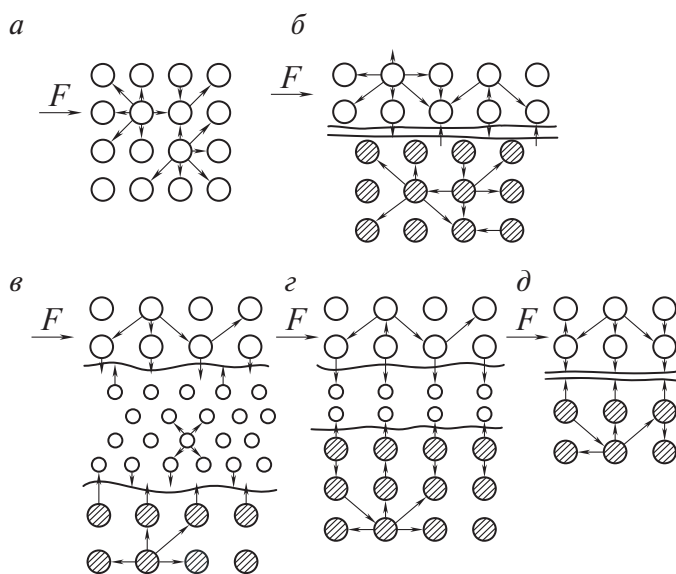


Рис. 1.2. Различные виды трения:

a — внутреннее; $б$ — адгезия поверхностей; $в$ — жидкостное; $з$ — граничное; $д$ — сухое

Вид трения в макрообласти определяется совокупностью видов трения в микрообласти контакта. Вообще трение в макрообласти является результирующей смесью разных видов трения, т. е. смешанным

трением, характеризующимся нестационарными трибологическими процессами. Области контакта можно представить как совокупность элементов структуры атомов, ионов, молекул в виде шаров. Между этими элементами действуют силы, которые соединяют их в одно тело. Вид элементов структуры и взаимодействие между ними оказывают наибольшее влияние на трибологические процессы, отсюда следует, что понимание трибологических процессов и явлений требует знания структуры принимающих участие в этих процессах тел и действующих сил. Трибологические процессы и явления можно рассматривать на разных уровнях: для выяснения некоторых проблем необходим анализ явлений в области ядра и электронов, в иных случаях — атомов, молекул или групп молекул и кристаллов.

В зависимости от наличия относительного движения различают *трение покоя и трение движения*, причем коэффициент трения в первом случае больше, чем во втором, в зависимости от характера движения — *трение скольжения и трение качения*. Сила трения качения примерно в 10 раз меньше силы трения скольжения. В зависимости от наличия смазочного материала между трущимися поверхностями — *трение со смазочным материалом и трение без смазочного материала*.

Согласно широко распространенной *молекулярно-механической теории*, поверхностные связи при трении формируются вследствие *упруго-пластической деформации* поверхностных слоев контактирующих тел и *адгезионного взаимодействия их поверхностей*. **Молекулярно-механическое изнашивание** получается в результате одновременного механического воздействия и воздействия молекулярных или атомных сил.

Данная теория базируется на представлении о двойственной природе трения и дискретном характере контакта между реальными поверхностями твердых тел. Неровности на поверхности любого твердого тела обуславливают контакт на отдельных элементарных площадках (пятнах) касания (рис. 1.3):

$$A_0 = ab > A_r = \sum_{i=1}^n A_r^i,$$

где n — число единичных контактов.

Общая площадь фактического контакта A_r складывается из суммы площадей отдельных пятен касания $A_r = \sum_{i=1}^n A_r^i$ и зависит от внешней нагрузки N , механических свойств контактирующих тел. Для неподвиж-

ного контакта двух металлических материалов (по Ф. Боудену) $A_r \approx N/H$, где H — твердость наименее твердого компонента. Для подвижного контакта при трении скольжения $A_r \approx \alpha (N/H)$, где α — коэффициент, зависящий от способности металла к упрочнению в процессе трения, от чистоты поверхности контакта и величины коэффициента трения. Обычно $\alpha \approx 2...4$, если $f = 0,7...1,5$.

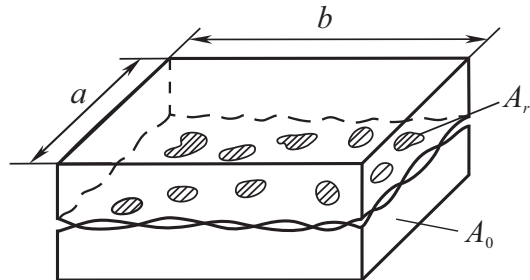


Рис. 1.3. Номинальная A_0 и реальная A_r площади контакта

Согласно молекулярно-механической теории, поверхностные связи при трении формируются вследствие упруго-пластической деформации поверхностных слоев контактирующих тел и адгезионного взаимодействия их поверхностей. По Ф. Боудену, сила трения — это сумма сопротивлений срезу металлических соединений F_c и сопротивлений пластическому оттеснению (пропахиванию) менее прочного металла при движении внедрившихся в него микронеровностей более твердого металла F_{Π} :

$$P = F_c + F_{\Pi} = \theta A_r + \tau S,$$

где θ — сопротивление металла на срез; A_r — площадь фактического контакта; τ — предел текучести менее твердого металла; S — площадь профилей царапин.

Формула обобщенного закона трения, полученного И. В. Крагельским, имеет вид

$$f = (\alpha A_r / N) + \beta,$$

где α и β — параметры, зависящие от молекулярных и механических свойств контактирующих поверхностей соответствующих тел.

Существует мнение, что при трении металлических тел обычно преобладает адгезионное взаимодействие их поверхностей. В этом случае коэффициент трения f может быть оценен из следующих соотношений:

$$f = \tau/H, \text{ или } f = \tau/(H - 2W/X),$$

где τ — сопротивление сдвигу; H — твердость менее прочного металла; W — удельная энергия адгезии контактирующих металлов; X — глубина внедрения твердой неровности в поверхность менее прочного материала.

Из последнего выражения следует, что коэффициент трения зависит от свойств прочности τ , H контактирующих металлов и от интенсивности адгезионного взаимодействия их поверхностей W . На интенсивность адгезионного взаимодействия металлических поверхностей оказывают влияние следующие факторы: состояние (чистота) поверхности, характер окружающей среды, химический состав и кристаллическая структура металлов, температура в зоне контакта и др.

При трении очищенных металлических поверхностей в глубоком вакууме, когда их адгезионное взаимодействие весьма велико, коэффициент трения может достигать значений 1,0—10,0 и более. При трении в воздушной среде коэффициент трения металлических материалов обычно не превышает 0,5—1,0.

1.2. Изнашивание металлов при трении

Трение — основная причина изнашивания деталей машин. Проблемы трения, изнашивания и смазывания изучает наука трибология, базирующаяся на фундаментальных законах физики, химии, механики сплошных сред, термодинамики и материаловедения.

Трибологические свойства металлических материалов в значительной степени зависят от состояния их поверхностных слоев. С поверхности, подвергаемой контактному механическому нагружению, коррозии и высоким температурам, начинается разрушение большинства изделий машиностроения. Наибольшие потери связаны с развитием процессов изнашивания поверхности деталей машин и инструмента. По мере развития технологий и перехода от макромасштабных к микро- и наномасштабным уровням рассмотрения структуры и свойств материалов роль поверхности многократно возрастает.

Работа любого механизма и машины связана с передачей энергии и потерями части передаваемой энергии на трение. Процесс трения,

сопровожаемый различными воздействиями, вызывает изнашивание поверхности материалов. Можно сказать так: всё, что испытывает трение, изнашивается, и это утверждение верно в общем случае, несмотря на впечатляющие успехи триботехники в создании безызносных узлов трения — исключения лишь подтверждают правило. Далеко не всё, что изношено, может быть восстановлено.

Износ (изнашивание) в общем случае можно охарактеризовать как изменение размеров, формы, массы или состояния поверхностного слоя твердого тела под влиянием внешней среды. Износ может вызываться трением поверхностей деталей машин одна о другую, воздействием на поверхность рабочей среды потоков жидкости, газа или контакта поверхности с твердыми частицами.

Различают *допустимый и предельный износ*. При допустимом износе сохраняется работоспособность детали, несмотря на изменение ее размеров и формы вследствие изнашивания. Предельный износ характеризуется такими изменениями размеров и (или) формы детали, при которых дальнейшее изнашивание приводит к потере работоспособности этой детали и узла трения или механизма в целом. Понятно, что допустимый износ меньше предельного.

К разновидностям износа относится износ на отдельном участке поверхности трения, или *местный износ*.

Методы измерения износа

Износ — результат изнашивания, выражаемый в абсолютных или относительных единицах. В абсолютных единицах износ характеризуется потерей массы детали ΔM , уменьшением ее линейных размеров U или объема V . Износ, отнесенный к пути трения, исходным размерам или объему, называется интенсивностью изнашивания J_h . Износ, отнесенный ко времени, в течение которого проявлялось изнашивание, определяет скорость изнашивания. Таким образом, наиболее употребительными характеристиками износа являются:

- *линейный износ U* , мкм (изменение размера поверхности при износе, измеренное перпендикулярно ей);
- *скорость изнашивания j* , мкм/ч ($j = dU/d\tau$ — отношение величины износа ко времени, в течение которого он образовался);

- *интенсивность изнашивания* J_h ($J_h = dU/dS$ — отношение величины износа к пути трения dS , на котором происходило изнашивание).

Чаше интенсивность изнашивания определяют по соотношению

$$J_h = Q/(\rho SP),$$

где Q — потери массы материала, г; ρ — плотность материала, г/см³; S — путь трения, см; P — геометрическая площадь контакта, см².

В данном случае J_h — безразмерная величина.

В некоторых случаях используют энергетическую интенсивность изнашивания

$$J_w = \Delta V/W_F = \Delta V/FS,$$

где ΔV — объем изношенного на пути S материала; F — работа сил трения; F — сила трения.

Разнообразие условий взаимодействия контактных поверхностей и свойств контактирующих материалов обуславливает влияние многих факторов, которые приводят к различным механизмам изнашивания и, как следствие, к разной износостойкости. Виды изнашивания и повреждения не являются характерными именно для данной пары трения, а зависят от условий работы. Изменение условий работы (вид смазки, скорость скольжения, температура) может приводить к изменению основного вида изнашивания поверхностей. Так, увеличение скорости скольжения вызывает повышение температуры и ускорение окислительных процессов, поэтому до критической скорости скольжения может наблюдаться схватывание поверхностей, а по достижении критической скорости возможен переход к окислительному изнашиванию вследствие увеличения скорости образования окисных пленок.

Износ деталей может быть определен с помощью следующих основных методов: микрометрического измерения (микрометраж); взвешивания деталей; анализа отработавшего масла; «меченых» атомов и замеров отпечатков, наносимых на изнашиваемую поверхность.

Основные требования, которые должны предъявляться к методу определения износа, сводятся к следующему:

- на испытание по определению износа должно затрачиваться по возможности минимальное время;
- метод должен позволять улавливать износ за сравнительно короткое время;

- при определении износа нежелательна частая разборка и сборка агрегатов;
- детали за время испытаний не должны сильно изнашиваться (если в этом случае не ставятся специальные цели).

До настоящего времени для определения износа деталей часто применяется метод микрометрического измерения. Данный метод базируется на определении размеров деталей при помощи микрометров или других измерительных приборов перед началом износа и в процессе работы машины.

Величину линейного износа определяют как разность глубин в разных местах трущейся поверхности. Определение износа деталей какого-либо агрегата этим методом требует большой затраты времени и во всех случаях сопряжено с некоторыми погрешностями. При малой длительности работы машины определить износ почти невозможно.

Для того чтобы определить значительный износ, нужно проводить довольно длительные испытания агрегатов с большим количеством разборок и сборок. Частые разборки и сборки приводят к нарушению первоначальных посадок деталей, что вызывает некоторые отклонения от исходного состояния испытуемого агрегата.

На точность измерения при микрометрировании влияют следующие факторы:

- определяя износ по диаметру отверстия цилиндра или поверхности вала, замеряют диаметр, который может изменяться не только от износа, но и вследствие деформации; значит, определить износ без существенной погрешности нельзя;
- ошибки в определении износа микрометрированием появляются от непостоянства температуры инструмента и измеряемой детали, особенно когда износ измеряется в микронах;
- повторно измерить один и тот же диаметр по одному и тому же направлению не удастся, поэтому точно определить износ в этом случае не всегда возможно.

С помощью метода микрометрирования возможно только приблизительно измерить износ в определенном месте детали.

Метод взвешивания деталей до испытаний и после них позволяет определять линейный износ как износ, распределенный равномерно по поверхности детали. При вычислении износа подсчитывается размер изношенной поверхности и учитывается удельный вес металла детали.

При необходимости определения суммарного износа деталей агрегата или узла применяется метод обнаружения металла в отработавшем масле.

Поскольку продукты износа деталей состоят из мельчайших металлических частиц, окислов металлов и продуктов химического взаимодействия металлов с активными составляющими масла, которые находятся в нем во взвешенном состоянии, то для определения суммарного износа от масла отбираются пробы, которые сжигаются, и в оставшейся золе содержание металла определяется с помощью химического анализа или полярографического метода.

Пользуясь этим методом, решают ряд задач, имеющих важное значение в определении износа, а именно:

- когда необходимо отбирать пробу масла, которая могла бы характеризовать среднее содержание железа в нем;
- как определить содержание железа в масле;
- к каким поверхностям отнести обнаруженный износ, если он был результатом трения нескольких поверхностей, и т. д.

В настоящее время все эти задачи решены. Основным недостатком данного метода является невозможность определения линейных износов отдельных деталей; положительной же стороной его является возможность определения износа на любом этапе испытаний без прекращения работы агрегата. Это дает возможность построить график износа агрегата и определить общие износы его при работе на разных режимах за короткое время. С применением данного метода удалось получить значительную экономию времени при испытаниях на износ.

Одним из методов определения суммарного износа деталей является метод меченых атомов, или радиоактивных изотопов, которые обладают способностью излучать электрически заряженные α - и β -частицы или электромагнитные лучи в процессе радиоактивного распада. Специальные приборы позволяют регистрировать и измерять излучение, а следовательно, обнаруживать частицы радиоактивного препарата в любой среде и определять его количество.

Таким образом, если в поверхностный слой детали ввести радиоактивное вещество, то в процессе работы машины с поверхности трения детали вместе с продуктами износа основного металла будут удаляться также и частички радиоактивного вещества. По количеству радиоактивного вещества в смазке можно установить нарастание износа в испытываемой паре деталей. При таком методе определения из-

носа нужно в первую очередь решить вопрос, каким способом ввести в поверхностный слой исследуемой детали радиоактивные изотопы без нарушения ее геометрической формы и физико-механических свойств металла, из которого она сделана.

Известны следующие способы насыщения деталей радиоактивными изотопами:

- изотопы вводятся в металл детали при ее отливке (данный способ является более целесообразным при активировании небольших деталей, для которых требуется короткий цикл обработки);
- радиоактивное вещество вводится в поверхностные слои детали через электролит, если деталь в процессе изготовления покрывается каким-либо металлом гальваническим способом;
- облучение (насыщение) поверхностных слоев детали радиоактивными изотопами;
- насыщение деталей способом диффузии, когда некоторые элементы проникают в поверхность твердого тела при его нагревании;
- способ Научно-исследовательского института гражданского воздушного флота (НИИГВФ) (на изнашиваемую поверхность детали запрессовывается вставка из радиоактивного металла, которая изнашивается вместе с основным металлом детали, что дает возможность судить о степени нарастания износа).

Последний способ отличается простотой и доступностью и может быть применен для активирования шеек валов, подшипников, поршневых колец и других деталей агрегатов без нарушения свойств поверхностных слоев деталей. Данный способ может быть применен не только для изучения износа, но и для постоянного контроля за сильно нагруженными деталями агрегата или машины.

Появление в масле радиоактивных частиц от активированной вставки, запрессованной на определенную глубину от поверхности трения, будет указывать на то, что износ данной детали достиг своего предела и, следовательно, машину нужно останавливать для разборки и ремонта.

Способ меченых атомов, или радиоактивных изотопов, в сравнении с методом определения износа по содержанию металла в масле путем химического анализа отличается значительно большей чувствительностью и дает возможность непрерывно оценивать содержание

радиоактивного элемента в циркулирующем масле. Этот метод определения износа хотя и является новым, но уже находит довольно широкое применение.

Для определения износа применяется еще один способ — так называемый способ искусственных баз, разработанный М. М. Хрущовым и Е. С. Берковичем.

Суть данного способа заключается в том, что на поверхности трения детали вырезают специальным прибором и инструментом маленькие лунки заранее известной геометрической формы. До испытания измеряют длину лунки на поверхности детали и вычисляют ее начальную глубину.

После проведения испытаний вторично измеряют длину лунки на поверхности детали и вычисляют изменившуюся глубину. Разность глубин до и после испытаний является величиной линейного износа в данном месте трущейся поверхности детали.

Способ искусственных баз является более точным в сравнении с микрометрическим измерением, так как дно вырезанной лунки является постоянной базой, от которой ведется измерение, и, кроме того, износ определяется в одном и том же месте, что исключает некоторые погрешности микрометрирования. Точность определения износа при данном методе исчисляется в 1–1,5 мк.

На рис. 1.4 показаны лунки, вырезанные на поверхности поршневого пальца и на зеркале цилиндра двигателя.

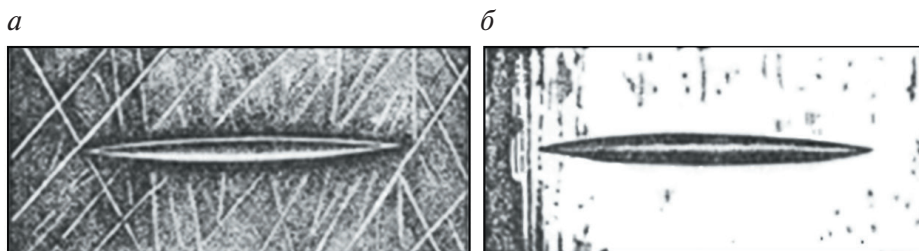


Рис. 1.4. Вырезанные лунки:

a — на поверхности поршневого пальца; *б* — на зеркале цилиндра двигателя

Существующие методы измерения износа заключаются как в измерении размеров изнашивающихся деталей с помощью обычных средств, так и в использовании методов на основе ядерно-физических процессов.

Область применения тех или иных методов измерения определяется:

- поставленной целью исследования;
- требуемой точностью измерения;
- возможностью измерения малых износов;
- временем, необходимым для измерения износа;
- возможностью измерения износа в условиях эксплуатации без разборки и остановки машины;
- затратами времени и средств, необходимыми для всего цикла подготовки, осуществления и обработки результатов измерения.

Для измерения износа применяются интегральные и дифференциальные методы оценки повреждений.

Наиболее целесообразны дифференциальные методы, позволяющие определить распределение износа по всей поверхности трения и оценить влияние износа на выходные параметры изделия. Иногда применяются методы оценки износа по выходным параметрам изделия или сопряжения. Классификация методов измерения износа приведена в таблице ниже.

Классификация методов измерения износа поверхностей трения

Метод измерения	Разновидности метода	Параметры измерения
Интегральный	Оценка суммарного износа	По изменению массы образца, по изменению объема образца, измерение зазора сопряжения
Продукты износа в смазке	Химический анализ, спектральный анализ, анализ при помощи радиоактивных изотопов	Измерение содержания элементов
Дифференциальный	Микрометрирование	Измерение размеров, профилографирование
Метод искусственных баз	Метод отпечатка, метод лунок, метод слепков	—
Метод поверхностной активации	Активация участка, применение вставок	—
Изменение выходных параметров сопряжения	Изменение коэффициента трения, утечек или расходов смазки, температуры	—

Метод измерения износа по потере массы или объема детали применяется, как правило, при исследовании образцов и не пригоден для

большинства деталей машин. Оценка износа по изменению выходных параметров сопряжения дает лишь косвенное представление о величине износа.

Рассмотрим основные методы измерения и оценки износа поверхностей трения при работе различных сопряжений в условиях их эксплуатации или испытаний.

Наиболее распространенным и доступным методом определения величины износа деталей является метод микрометрических измерений. Данный метод чаще всего используется при условии больших абсолютных величин износа деталей. Он основан на измерении детали при помощи механических контактных или каких-либо других приборов до и после проведения испытаний на изнашивание.

Е. Хорнбоген продемонстрировал зависимость износостойкости материалов от двух групп основных факторов («внутренних» — свойств материала твердого тела и «внешних» — условий, характеризующих вид трения) в виде гелиоцентрической схемы (рис. 1.5).

«Внутренние» свойства (круг 1): поверхностная энергия, кристаллическая структура, микроструктура, стабильность фаз, пластичность, способность к деформационному упрочнению, трещиностойкость, теплопроводность, теплоемкость. «Внешние» свойства (круг 2) характеризуют вид трения (качение или скольжение), условия в зоне взаимодействия твердых тел (температура, давление, скорость относительного перемещения, шероховатость поверхности, скорость рабочей среды или смазочного материала), характер приложения нагрузки (статическая, динамическая, постоянная, переменная, реверсивная), материал контртела. Взаимное влияние указанных групп факторов приводит в результате к какому-нибудь из известных видов изнашивания (круг 3) и разрушения контактной поверхности детали по механизмам микрорезания, царапания, отслаивания, выкрашивания или схватывания и заедания (треугольник 1, 2, 3).

Процессы упругопластической деформации при трении металлов локализуются в микрообъемах поверхностного слоя, примыкающих к пятнам касания, и обусловлены действием высоких контактных напряжений. Характер распределения максимальных касательных напряжений в зоне фрикционного контакта показан на рис. 1.6, на котором видно, что при трении скольжения максимальный уровень касательных напряжений достигается непосредственно на поверхности скольжения.



Рис. 1.5. Схема взаимосвязи износа материала с его структурой и условиями изнашивания (по Е. Хорнбогену)

По мере увеличения расстояния от поверхности трения напряжения снижаются примерно по степенному закону. При трении качения максимальный уровень напряжений реализуется на некотором расстоянии от поверхности качения, которое зависит от геометрии контакта, нормальной нагрузки и деформационных характеристик материала, таких как модули упругости, коэффициенты Пуассона.

Микрообъемы поверхности металла, примыкающие к пятнам касания, подвергаются упругопластической деформации в условиях сдвига под давлением (рис. 1.7). При этом величина внешнего давления по Ф. Боудену приблизительно равна твердости (микротвердости) кон-

тактирующих металлов. Так, для сталей величина контактного давления может составлять 1–10 ГПа. Деформирование металлов при данном состоянии позволяет достигнуть в поверхностных слоях трущихся металлов очень высоких степеней деформации, порядка 10^2 .

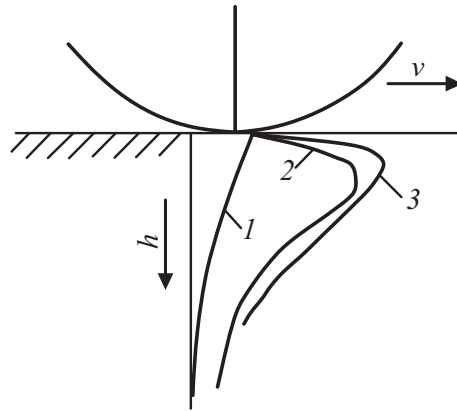


Рис. 1.6. Характер распределения касательных напряжений по глубине поверхностного слоя h в зоне фрикционного контакта твердых тел:

1 — при трении скольжения; 2 — при трении качения;
3 — при трении качения с проскальзыванием

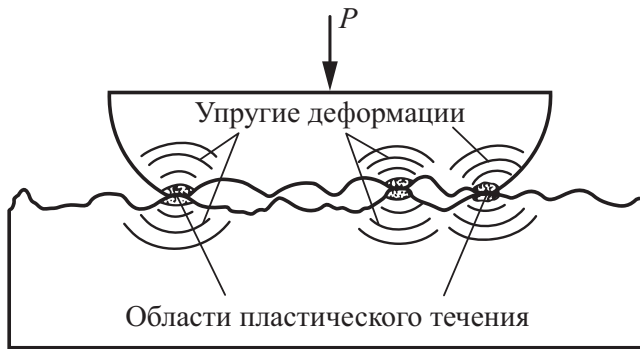


Рис. 1.7. Локальный характер упругопластической деформации в области фактического контакта при трении скольжения

На рис. 1.8 показано, что каждая единичная микронеровность, внедренная в поверхность контртела, при движении создает в нем две зоны напряжений, различных по знаку.

Перед фронтом микронеровности в зоне сжимающих напряжений возникает валик из деформированного металла. Позади микронеров-

ности в результате действия силы трения в материале образуются растягивающие напряжения. Адгезионное взаимодействие происходит на границе зоны сжимающих напряжений с неровностью. По мере смещения микровыступа в пределах, ограниченных прочностью адгезионных связей на контакте, валик растет за счет материала, вытесненного при смещении. Позади выступа соответственно растет деформация растяжения. По достижении критической величины перемещения неровности молекулярные связи на контакте разрушаются, при этом неровность подминает валик или перескакивает через него. Таким образом, материал контакта за один проход микровыступа испытывает последовательное воздействие сжимающих и растягивающих напряжений, а движение неровности (и тела) имеет скачкообразный характер.

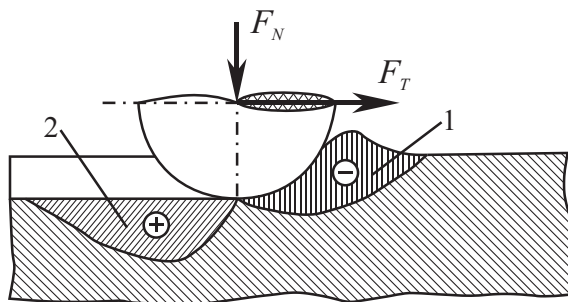


Рис. 1.8. Напряженное состояние, создаваемое скользящей жесткой сферической микронеровностью по гладкой поверхности сопряженного материала:

1 — зона сжимающих напряжений; 2 — зона растягивающих напряжений

Для замедления изнашивания и увеличения срока службы деталей используют рациональные конструкции опор трения, уменьшают шероховатость поверхностей контакта, применяют жидкие и твердые смазки, подбирают материалы трущихся пар и способы их упрочнения применительно к условиям изнашивания.

2. Классификация и характеристика видов и механизмов изнашивания

.....

Согласно ГОСТ 27674—88, **изнашивание** — это процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

В условиях всех видов трения происходит разрушение трущихся поверхностей, т. е. поверхности изнашиваются. Согласно ГОСТ 23.002—78, изнашивание рабочих поверхностей деталей машин и механизмов классифицируют по причинам, вызывающим износ. Различают три основных вида изнашивания: *механическое* (абразивное, гидро- и газоабразивное, эрозионное, гидро- и газозерозионное, кавитационное, усталостное, при фреттинге, при заедании); *коррозионно-механическое* (включающее те виды изнашивания, что и в первом случае, осложненные коррозией, кроме того, окислительное и фреттинг-коррозия); *при действии электрического тока* (электроэрозионное), включающее те же виды механического изнашивания, но усиленные электрическим током (рис. 2.1).

Изнашивание является сложным процессом, зависящим от двух взаимосвязанных групп факторов. С одной стороны, процесс изнашивания определяется условиями работы детали с учетом приложенных нагрузок, скорости перемещения, агрессивности среды и температуры эксплуатации. С другой стороны, он зависит также от способности металла детали противостоять действию изнашивающих нагрузок, что определяется его химическим составом, термической обработкой, структурой и полученными в результате этого механическими свойствами (см. рис. 1.5)

Наиболее общим видом изнашивания является механическое изнашивание в результате механических воздействий. Ниже приведены

основные виды механического изнашивания в зависимости от характера механического воздействия (ГОСТ 27674–88).

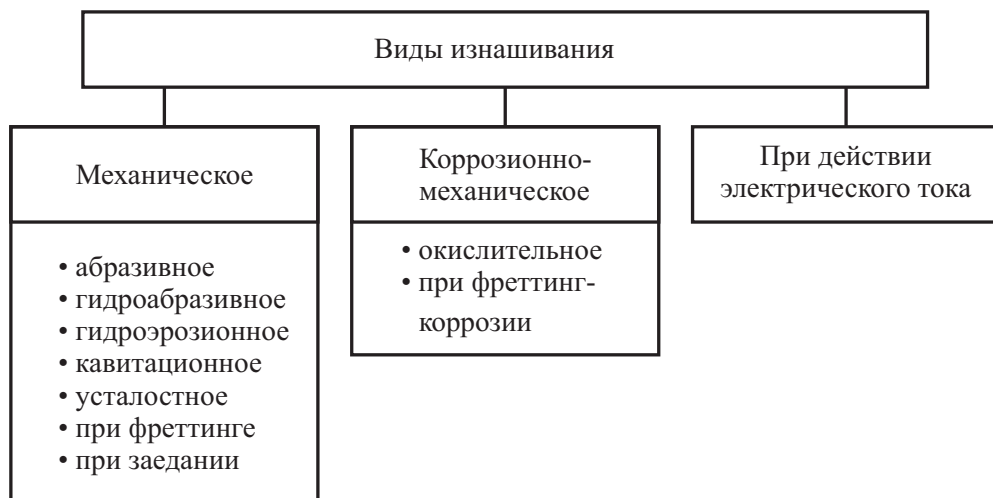


Рис. 2.1. Виды изнашивания

Механическое изнашивание возникает в результате воздействия твердых частиц на трущиеся поверхности. В эту группу следует отнести такие виды изнашивания, как абразивное, гидро- и газоабразивное, усталостное, кавитационное, эрозионное.

Абразивное изнашивание — изнашивание, возникающее в результате механических воздействий посредством режущего и царапающего действия твердых тел или частиц при наличии относительной скорости перемещения.

Гидро- и газоабразивное изнашивание появляются в результате воздействия твердых тел или частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа.

Усталостное изнашивание вызывает изменение поверхности трения или отдельных участков в результате повторного деформирования микрообъемов материала, приводящего к возникновению трещин и отделению частиц.

Кавитационное изнашивание поверхности происходит при относительном увеличении скорости движения твердого тела в жидкости, т. е. в условиях гидродинамической кавитации — нарушения сплошности внутри жидкости.

Эрозионное изнашивание возникает в результате воздействия потока жидкости или газа.

Изнашивание при заедании (адгезионное изнашивание) — изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность.

Изнашивание при фреттинге — механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении.

Коррозионно-механическое изнашивание есть изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрическим взаимодействием материала со средой.

Окислительное изнашивание — коррозионно-механическое изнашивание, при котором преобладает химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой.

Изнашивание при фреттинг-коррозии — коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях.

Электроэрозионное изнашивание — эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

К факторам, определяющим интенсивность изнашивания, относятся:

- род трения (скольжения, качения, качения с проскальзыванием);
- вид трения (сухое, граничное, гидродинамическое);
- среда (воздух, вода, газ, почва и т. п.);
- вид контакта пар трения (точка, линия, плоскость, цилиндр, сфера);
- характер движения (равномерное, непрерывное и т. д.);
- вид движения (вращательное, поступательное, возвратно-поступательное);
- характер нагрузки (постоянная, неустановившаяся, знакопеременная);
- величина нагрузки;
- скорость перемещения трущихся поверхностей;
- температурные условия.

Изнашивание при фреттинге происходит в болтовых и заклепочных соединениях и других деталях, находящихся в подвижном контакте. Два последних вида изнашивания (коррозионно-механическое и электроэрозионное) возникают в случаях, когда воздействие от меха-

нического изнашивания осложняется действием окислительной среды или электрического тока соответственно. В процессе изнашивания происходит деформирование и разрушение микрообъемов поверхности металла с последующим их отделением в виде частиц.

Для машиностроения наиболее важно изнашивание твердых тел при абразивном или адгезионном воздействии, когда два тела соприкасаются под действием нагрузок или рабочая поверхность находится в контакте с твердыми частицами. Изнашивание развивается на контактной поверхности под действием сил трения. Конвисаров Д. В. считал, что продукты изнашивания, состоящие из микроскопически малых обломков структуры тел трения, — основной признак изнашивания в точном смысле этого понятия. Все это относится к одной составляющей изнашивания — к диспергированию. Другая составляющая изнашивания — смятие поверхностей. При этом диспергирование и смятие действуют совместно.

2.1. Абразивное изнашивание

Абразивным называется изнашивание поверхности детали, возникающее в результате деформирующего, режущего или царапающего действия твердых частиц, чаще всего минерального происхождения (руда при ее добыче, переработке и транспортировке, кварцевый песок, содержащийся в почве при ее сельскохозяйственной, строительной-дорожной и другой обработке). Абразивное изнашивание происходит и при взаимодействии пар трения, когда шероховатая деталь перемещается под нагрузкой относительно другой из более мягкого металла.

Сущность абразивного износа заключается в разрушении металла твердыми зёрнами абразива при пластическом деформировании и микрорезании трущихся поверхностей. Механизм данного вида изнашивания заключается в удалении материала с изнашиваемой поверхности в виде более или менее дисперсных кусочков, хрупко отделившихся при одно- или многократном воздействии абразива, в виде очень мелкой стружки и фрагментов разрушенного материала, предварительно выдавленного абразивной частицей по сторонам пластически деформированной зоны.

Потоки жидкости или газа со взвешенными абразивными частицами являются причиной гидро- или газоабразивного изнашивания.

Изнашивающие абразивные частицы могут быть минерального происхождения (например, пыль, содержащая кварц), окалиной или наклепанными металлическими продуктами изнашивания, твердыми структурными составляющими одной из сопряженных поверхностей. Твердые частицы могут иметь разную форму и быть различным образом ориентированы гранями или ребрами относительно изнашиваемой поверхности, поэтому резать и снимать стружку могут только некоторые из них, большая же часть пластически деформирует более мягкий материал, оставляя следы в виде выдавленных рисок, царапин, канавок или отпечатков. Навалы, образующиеся по краям таких пластически выдавленных царапин, сминаются другими абразивными зернами, подвергаясь иногда неоднократному повторному передеформированию.

Абразивный износ является ведущим для машин и оборудования горнорудного производства, строительной, дорожной, почвообрабатывающей техники, инструмента производства кирпича, бетона и других строительных материалов. Абразивный износ и защита от него — одна из центральных проблем науки и техники, т. к. в промышленно развитых странах стоимость затрат, связанных с износом деталей, подверженных различным видам изнашивания, составляет более 10 % валового национального дохода. Половина из них связана с абразивным изнашиванием, поэтому выяснение закономерностей сопротивления металлических материалов этому виду износа является актуальной проблемой трибологии и триботехники при выборе наиболее стойких материалов деталей машин, подвергающихся при эксплуатации интенсивному абразивному изнашиванию.

Абразивное изнашивание, наблюдаемое при контакте с абразивом, может быть подразделено на два вида в соответствии с характером силового взаимодействия поверхности детали с абразивом:

- абразивное изнашивание материала детали при статических прижимных нагрузках, возникающее при продольном перемещении поверхности детали и абразива;
- абразивное изнашивание материала детали в условиях динамического воздействия, возникающего при их соударении.

По характеру силового воздействия абразивных частиц на трущиеся поверхности детали различают:

- скольжение детали по монолитному образцу;
- качение детали по абразиву;
- соударение с частицами абразива;
- соударение детали с монолитным абразивом;
- влияние потока абразивных частиц на поверхность детали;
- скольжение детали в массе абразивных частиц;
- взаимодействие сопряженных деталей в контакте с абразивными частицами.

Основной характеристикой поверхности, определяющей абразивное изнашивание в условиях статического нагружения, является наличие на ней хорошо различимых мелких царапин и углублений различной протяженности, всегда ориентированных в направлении движения абразива (рис. 2.2).

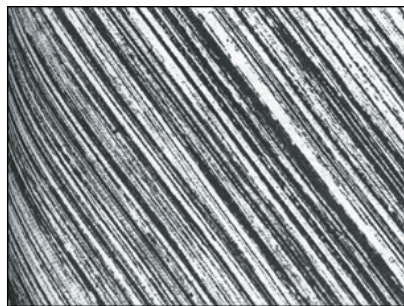


Рис. 2.2. Рельеф поверхности зуба ковша экскаватора после изнашивания при скольжении по абразиву, $\times 3$

Повышению износостойкости материалов при абразивном изнашивании способствуют:

- насыщение поверхностных слоев элементами, образующими высокотвердые соединения карбидов, нитридов, боридов металлов;
- способность более мягких структур удерживать высокотвердые кристаллы в поверхностном слое;
- способность материала упрочняться при деформировании;
- различные виды обработки поверхности (закалка, цементация, азотирование, борирование, обкатывание роликами, напыление износостойких материалов, обработка лучом лазера, термохимические и физические методы и т. д.).

Стойкость материалов при абразивном изнашивании в большой степени зависит от условий и режимов эксплуатации. Так, двигатель автомобиля, эксплуатируемого в песчаных районах, требует капитального ремонта после пробега в 15 тыс. км, тогда как в условиях незапыленного воздуха он проходит без ремонта 150 тыс. км и более.

Помещение абразивных частиц в зону силового контакта деталей со смазочным материалом резко увеличивает износ. Данное явление наблюдается в подшипниках скольжения двигателей, цилиндро-поршневой группе, трансмиссиях и т. д. Концентрация абразивных частиц также способствует возрастанию износа. Эффективными методами защиты от попадания абразива в зону трения являются различные уплотнения, фильтры и др.

Рассматривая процесс абразивного изнашивания, необходимо отметить частные случаи его проявления:

- абразивное изнашивание при ударе;
- гидро- и газоабразивное изнашивание.

Изнашивание материалов под действием твердых частиц в потоках жидкости или газа при газо- или гидроабразивном изнашивании, несмотря на различное состояние сред, имеет много общего. Воздействие абразивной частицы, переносимой воздушным или жидкостным потоком на поверхность трения, сопровождается либо ударом с последующим образованием на ней лунок, либо скольжением, формирующим царапины. *Газоабразивное и гидроабразивное* изнашивание возникает под действием твердых абразивных частиц, увлекаемых потоком газа или жидкости. Газоабразивное изнашивание наблюдается в котлах, работающих на пылевидном топливе, в деталях пневмотранспортных устройств; гидроабразивное — в деталях насосов, гидросистем, распределителей, заслонок, вентилях, различных трубопроводов и т. д.

Жидкость или газ, в которых происходит перемещение абразивных частиц относительно поверхностей деталей, оказывает разупрочняющее действие на поверхностный слой материала. При этом следует различать два случая взаимодействия абразивных частиц с материалом.

Уровень динамического воздействия и макрорельеф поверхности трения в первую очередь определяются ориентацией газо- или гидроабразивного потока к этой поверхности, или так называемым углом атаки (рис. 2.3).

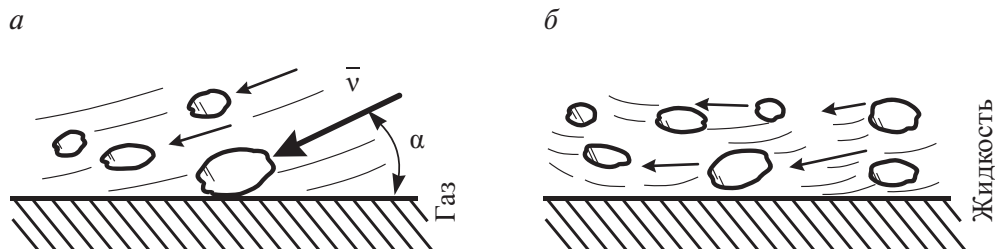


Рис. 2.3. Схемы газоабразивного (а) и гидроабразивного (б) изнашивания

Угол атаки α — это угол наклона вектора скорости абразивной частицы к поверхности детали. Различают два крайних случая:

- угол α равен или близок к 90° (α_{\max});
- угол α близок к 0° (α_{\min}).

Переход от α_{\max} к α_{\min} сопровождается изменением условий внешнего воздействия на поверхностный слой и соответственно количественными и качественными изменениями процесса изнашивания. При угле атаки равном или близком к 90° абразивные частицы осуществляют прямой удар по поверхности детали. При этом некоторая доля кинетической энергии твердой частицы затрачивается на упругое деформирование материала, а оставшаяся часть после исчерпания упругости материала расходуется на его пластическое деформирование и разрушение, а также на раздробление абразивной частицы. В случае пластического деформирования поверхностного слоя более высокую износостойкость показывает тот материал, который способен накопить до разрушения большее количество скрытой энергии. Выделение большого количества энергии в момент удара частицы вызывает мгновенный нагрев микрообъемов поверхностного слоя. По мере уменьшения угла атаки до 0° величина ударного импульса снижается.

На процесс абразивного изнашивания могут влиять природа и свойства абразивных частиц, агрессивность среды, свойства изнашиваемых поверхностей, характер взаимодействия частиц и поверхностей, нагрев и другие факторы. Общим для абразивного изнашивания является механический характер разрушения поверхностей.

Основные разновидности абразивного изнашивания различаются по способу закрепления частиц (закрепленные, полужакрепленные, свободные) и по способу контакта поверхности трения с абразивными частицами (скольжение, качение, удар).

Изнашивание закрепленными абразивными частицами характерно для изнашивания ковшей экскаваторов, ножей бульдозеров и скреперов, горного и камнеобрабатывающего инструмента и т. д. Данному виду изнашивания близок процесс шлифования при механической обработке металлов.

В процессе изнашивания происходит упрочнение (наклеп) поверхностного слоя за счет механического воздействия деформированием, однако возможно и разупрочнение поверхностного слоя в результате нагрева или физико-химического воздействия окружающей среды, если она вводится для охлаждения или промывки.

М. М. Хрущов и М. А. Бабичев установили, что относительная износостойкость ε технически чистых металлов и отожженных сталей при трении о закрепленные абразивные частицы прямо пропорциональна твердости HV этих металлов и сталей:

$$\varepsilon = b \cdot HV, \quad (2.1)$$

где b — коэффициент пропорциональности.

Аналогичная зависимость характерна и применима для полимерных материалов. Для термически обработанных (закалка и отпуск) конструкционных и инструментальных углеродистых и легированных сталей установлена зависимость

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b' (HV - H_0V_0), \quad (2.2)$$

где ε_0 — относительная износостойкость стали в отожженном состоянии; b' — коэффициент пропорциональности, зависящий от химического состава стали; HV и H_0V_0 — соответственно твердость сталей в закаленном и отожженном состоянии.

Классическая зависимость относительной износостойкости ε при абразивном изнашивании технически чистых металлов, углеродистых и хромистых сталей от их твердости по Винеру, полученной отжигом и отпуском при различных температурах после закалки, графически представлена на рис. 2.4, по данным М. М. Хрущова и М. А. Бабичева.

Как видно из рис. 2.4, зависимость относительной износостойкости для чистых металлов описывается выражением (2.1), т. к. экспериментальные точки располагаются на прямой, проходящей через начало координат. Зависимости для термообработанных углеродистых и легированных сталей описываются выражением (2.2), т. к. экспериментальные точки располагаются на прямых линиях, не проходящих через начало координат.

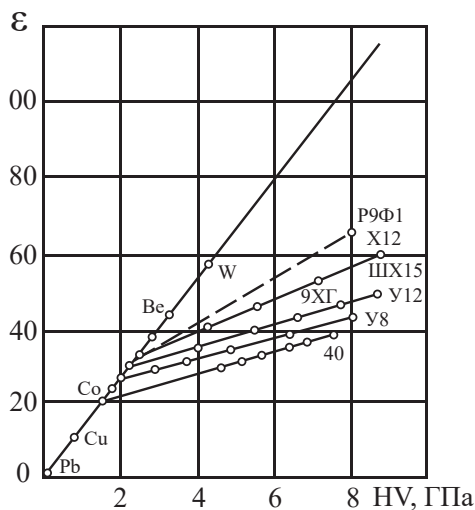


Рис. 2.4. Зависимость относительной износостойкости чистых металлов, конструкционных и инструментальных сталей ε от их твердости HV при абразивном изнашивании (по М. М. Хрущову и М. А. Бабичеву)

Для углеродистых сталей 40, У8, У12 в состоянии после нормальной закалки и отпуска при разных температурах зависимость относительной износостойкости от твердости описывается выражением (2.2). Причем коэффициенты b' для этих сталей примерно равны, т. к. прямые линии для них параллельны. Для инструментальных сталей 9ХГ, ШХ15 и Р9Ф1 справедлива зависимость износостойкости от твердости

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + k (HV - HV_0), \quad (2.3)$$

где ε_0 , HV и HV_0 — соответственно относительная износостойкость и твердость материалов в закаленном и отожженном состоянии; k — превосходящий коэффициент b' в выражении (2.2) (наклон прямых линий более крутой (рис. 2.4).

Наивысшие значения износостойкости сталей на этом графике соответствуют мартенситу закалки (крайние правые точки на прямых), наименьшие значения — зернистому перлиту при максимальной температуре отпуска (крайние левые точки на прямых для термообработанных сталей).

Интервал между этими крайними структурными состояниями отражает износостойкость отпущенного мартенсита, далее — бейнита, троостита и сорбита отпуска соответственно.

Видно, что принципиально аналогичная чистым металлам и отожженным углеродистым сталям взаимосвязь между твердостью и из-

носостойкостью имеет для структур после закалки и отпуска менее крутую зависимость. По мере снижения твердости (повышения температуры отпуска) износостойкость уменьшается, причем при одинаковой твердости чем больше содержание углерода и карбидообразующих элементов в стали, тем износостойкость выше. Это естественно, потому что карбиды как наиболее твердая фаза повышают сопротивление сталей абразивному изнашиванию. Однако известно, что большее значение имеет и металлическая матрица стали, которая должна сама противостоять воздействию абразивных частиц и прочно удерживать карбиды от выкрашивания. Поэтому из трех принципиально различных по природе фаз матрицы — феррита, мартенсита и остаточного аустенита — феррит имеет наименьшую износостойкость, а мартенсит и аустенит — наибольшую как обладающие максимальной способностью к фрикционному упрочнению, особенно если аустенит метастабилен. Следовательно, стали с метастабильным аустенитом вообще не вписываются в зависимость, показанную на рис. 2.4. Таким же примером несовпадения между исходной твердостью и износостойкостью служит высокомарганцевая сталь со стабильным аустенитом, имеющим низкую энергию дефектов упаковки. При исходной твердости стали 110Г13Л порядка 2000 МПа ее абразивная износостойкость находится на уровне стали 40 после закалки и низкого отпуска со структурой отпущенного мартенсита и твердостью более 6000 МПа, т. к. рабочая поверхность стали 110Г13Л приобретает микротвердость примерно такую же, как закаленная сталь 40.

Гетерофазные структурные составляющие — перлит, сорбит и троостит — имеют карбиды разной степени дисперсности и по износостойкости занимают промежуточное положение между ферритом и мартенситом. Поэтому ряд исследователей обнаруживает отклонения от прямолинейной зависимости между исходной твердостью и износостойкостью для сталей разного класса в связи с тем, что разные структурные составляющие имеют неодинаковую способность к фрикционному упрочнению или появление избыточного цемента в заэвтектоидных сталях, несмотря на рост твердости, не вызывает пропорционального роста абразивной износостойкости вследствие хрупкости крупных карбидов.

При исследовании влияния соотношения твердости абразива $HВ_a$ и твердости изнашиваемых материалов $HВ_m$ на величину износа получены следующие зависимости:

- при $HV_a/HV_m < 0,7...1,1$ износа практически нет и износостойкость материала велика;
- при $0,7-1,1 < HV_a/HV_m < 1,3...1,7$ износ пропорционален величине отношения HV_a/HV_m ;
- при $HV_a/HV_m > 1,3...1,7$ относительный износ имеет конечную и постоянную величину, не зависящую от HV_a/HV_m .

Общая закономерность изнашивания в струе абразивных частиц состоит в том, что при увеличении отношения HV_a/HV_m более единицы интенсивность изнашивания резко возрастает.

На повышение износостойкости влияет насыщение поверхностных слоев элементами, образующими высокотвердые соединения карбидов, нитридов, боридов металлов, а также способность более мягких структур (аустенит) удерживать высокотвердые кристаллы в поверхностном слое и упрочняться в процессе деформирования при трении (например, высоколегированные стали аустенитного класса).

Изнашивание в абразивной массе наблюдается у рабочих органов почвообрабатывающих, дорожных и строительных машин, ковшей экскаваторов, драг и канавокопателей и т. д. Износостойкость деталей при этом виде абразивного изнашивания прямо пропорциональна твердости материалов. Существенное влияние на величину износа оказывает степень насыщенности массы абразивными частицами. В каждом конкретном случае существует определенная насыщенность частицами, при которой износ материала достигает максимума. Различные грунты имеют различную изнашивающую способность. Если принять изнашивающую способность глинистых грунтов за 1, то для песчаных она будет 1,5; для суглинистых 1,9; для супесчаных 2,3.

Важное значение при изнашивании в абразивной массе имеют химическая активность и влажность почв и грунтов, степень закреплённости абразивных частиц. Многие узлы трения и рабочие органы машин изнашиваются в результате трения о свободный абразив в присутствии коррозионно-активных сред, например в морской и пресной воде. В результате окислительно-восстановительных реакций и трибохимических процессов на поверхности трения происходит выделение водорода, часть которого диффундирует в сталь, интенсифицируя изнашивание.

Изнашивание исходно свободными абразивными частицами широко распространено и часто встречается при эксплуатации машин и оборудования. Несмотря на постоянное совершенствование средств защиты (воздушные, топливные и масляные фильтры, уплотнения),

практически все узлы трения сельскохозяйственных, дорожных, горных, транспортных и других машин работают в условиях попадания в зазоры между сопряженными деталями исходно свободных (незакрепленных) абразивных частиц.

2.2. Эрозионное изнашивание

Эрозия в широком понимании — процесс поверхностного разрушения вещества под воздействием внешней среды. В машиностроении эрозия имеет более узкое понятие — разрушение поверхности материалов вследствие механического воздействия высокоскоростного потока жидкости, газа или пара. Разрушение металлов под действием электрических зарядов также относится к эрозии. Урванцев Л. А. подразделяет эрозию на газовую, кавитационную, абразивную и электрическую. Каждый вид эрозии имеет подвиды, которые являются сочетанием отдельных видов, например газовая эрозия может быть газоабразивной, газoeлектрической и т. д.

Эрозионное изнашивание происходит в результате механического воздействия на поверхность материала потоков жидкости или газа, которые разрушают оксидную пленку металла, а абразивные частицы в потоке способствуют более интенсивному изнашиванию. Такое воздействие сопровождается механическим уносом с поверхности частиц материала, что приводит к утонению стенок детали, могут появиться свищи. Скорость разрушения прямо пропорциональна кинетической энергии движущихся частиц и шероховатости поверхности деталей. Эрозия протекает совместно с окислительными процессами. Сильно подвергаются эрозионному изнашиванию колеса турбодетандеров, дроссельные вентили. Большим сопротивлением эрозионному изнашиванию обладают вязкие металлы, способные к упрочнению, например аустенитные марганцовистые стали. Предупреждает развитие эрозионного изнашивания в запорной арматуре своевременное устранение неплотностей. Эрозионное изнашивание близко к абразивному как по своей природе, так и по характеру воздействия. Происходит оно, например, вследствие движения очищающе-охлаждающего промывочного или продувочного агента в трубах. Чем выше скорость его потока, чем больше в нем твердых абразивных фракций и чем дольше действие этого потока на дан-

ную поверхность, тем интенсивнее изнашивание и четче проявляется результат — эрозионный износ. Такому изнашиванию в автомобиле подвержены в первую очередь рабочие поверхности тарелок выпускных клапанов двигателя, распылители форсунок, жиклеры карбюратора. Эрозионному изнашиванию подвергаются также детали арматуры, осуществляющие дросселирование жидкости: плунжеры и седла дросселирующих и регулирующих клапанов. Различают процессы щелевой или ударной эрозии и кавитационного разрушения металла. При щелевой эрозии поверхности деталей размываются действием струи влажного пара, проходящего с большой скоростью через щель, образуемую седлом и плунжером. При ударной эрозии материал разрушается под действием ударов капель воды о поверхность детали. При кавитационном режиме движения в потоке быстро движущейся среды и соответствующих гидродинамических условиях образуются пузырьки (пустоты) в результате нарушения ее сплошности. Схлопываясь, они создают местные гидравлические удары, которые, действуя на металлическую поверхность, разрушают ее. Увеличение срока службы деталей при эрозионном изнашивании достигается в результате изменения режимов работы арматуры: уменьшения скорости среды в дросселирующем сечении путем снижения перепада давлений, применения ступенчатого (каскадного) дросселирования, увеличения сечения отверстий для прохода среды, применения эрозионно-стойких материалов.

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа или пара складывается из трения сплошного потока и его ударов о поверхность. В результате трения происходит накопление дефектов кристаллического строения, образование микротрещин, расшатывание и вымывание отдельных объемов материала. Скорость изнашивания в этом случае невелика, но большая роль принадлежит динамическому действию потока или струи. В зависимости от свойств материала возможны вырывы отдельных объемов или групп зерен с неблагоприятной ориентацией в отношении приложенных сил. В пластичных материалах, обладающих способностью к наклепу, вначале накапливаются микропластические деформации отдельных участков, а когда способность к упрочнению исчерпывается, эти участки разрушаются, вымываются. Жидкость, внедряющаяся при ударах в образовавшиеся микротрещины, ведет себя подобно клину, раздвигая стенки трещины.

Эрозия в начальный период на гладкой поверхности развивается весьма медленно, но после появления пораженных мест усиливается.

Это можно объяснить повышением хрупкости поврежденного поверхностного слоя в связи с накоплением микротрещин, расклинивающим действием жидкости и усилением ударного действия из-за большого вихреобразования у поверхности.

Разрушению от эрозии часто подвергаются рабочие (отсечные) кромки золотников гидравлических агрегатов. Струи топлива, проникая во время отсечки с большой скоростью в зазор между цилиндрическими поверхностями золотника и втулки, разрушают металл у рабочей кромки. Это случай щелевой эрозии, которой подвержены клапаны запорных и регулирующих устройств гидравлических и паровых систем.

Эрозионному изнашиванию подвержены стальные и чугунные поршневые кольца авиационных двигателей (рис. 2.5), которые скользят по хромированной поверхности восстановленного при ремонте зеркала цилиндра. Из-за плохой прирабатываемости колец не обеспечивается достаточное их прилегание к стенкам цилиндра — происходит прорыв газов и интенсивный местный нагрев рабочей поверхности кольца. Наиболее размягченные частицы металла отрываются и уносятся потоком газов. Более стойкие структурные составляющие, оказываясь изолированными, разрушаются. На поверхности образуются продолговатые раковины ветвистого строения. Эрозионное изнашивание начинается часто с микроцарапин, возникающих при схватывании поверхностей трения. Уменьшить разрушение колец можно улучшением их приработки.



Рис. 2.5. Очаги эрозии на поверхности поршневого кольца авиационного двигателя

На процесс эрозионного изнашивания оказывает влияние присутствие посторонних частиц в потоке. Например, лопатки турбин более интенсивно изнашиваются под действием пара, содержащего частицы соли. Если поток содержит абразивные частицы, то изнашивание становится эрозионно-абразивным. Скорость эрозионного изнашивания зависит от свойств твердых частиц, их концентрации, скорости движения в потоке.

Эрозия и коррозия часто протекают совместно. Коррозионно-эрозионное изнашивание представляет собой разновидность коррозион-

но-механического изнашивания. Газовая коррозия и эрозия действуют совместно, например, в выпускных клапанах высоконапряженных деталей двигателей внутреннего сгорания и на входных кромках лопаток компрессора газотурбинных двигателей.

2.3. Кавитационное изнашивание

Под **кавитацией** (от латинского слова *cavitas* — пустота) понимают явление образования в движущемся по поверхности твердого тела потоке жидкости полостей в виде пузырей, наполненных парами, воздухом или газами, растворенными в жидкости и выделившимися из нее. В движущемся с большой скоростью потоке при сужении и наличии препятствий на его пути давление может упасть до значения, соответствующего давлению парообразования при данной температуре. При этом, в зависимости от сопротивления жидкости растягивающим усилиям, может произойти разрыв, нарушение сплошности потока. Образующаяся пустота заполняется паром и газами, выделившимися из жидкости. Воздух, вовлекаемый в поток, облегчает возникновение кавитации. Образовавшиеся парогазовые пузыри размерами порядка десятых долей миллиметра, перемещаясь вместе с потоком, попадают в зоны высоких давлений. Пар конденсируется, газы растворяются и в образовавшиеся пустоты с большим ускорением устремляются частицы жидкости; происходит сопровождаемое гидравлическим ударом восстановление сплошности потока (рис. 2.6). При определенных типах кавитации на площади в 1 см^2 в течение 1 с могут образоваться и разрушиться более 30 млн кавитационных пузырьков. Наложение большого числа таких микроударов приводит к образованию очагов разрушения на поверхности металлической детали (рис. 2.6).

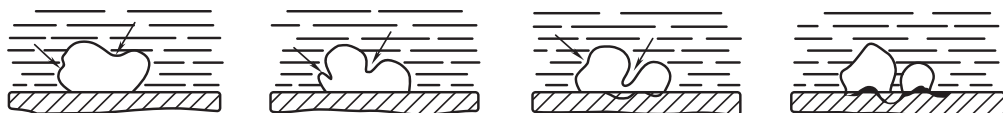


Рис. 2.6. Схема гидравлических ударов при сокращении кавитационного пузыря

Гидродинамическая кавитация наблюдается в трубопроводах, гидромониторах и потоках, обтекающих лопатки центробежных, про-

пеллерных насосов и лопасти гидравлических турбин и гребных винтов. Явление кавитации вызывает вибрации, стуки и сотрясения, что приводит к расшатыванию крепежных связей, обрыву болтов, смятию резьб, фрикционной коррозии стыков, нарушению уплотнений и усталостным повреждениям. Кавитация понижает КПД машин и гребных винтов и вызывает непосредственное разрушение поверхностей деталей в зоне ее действия в виде ямок, сливающихся в микрокаверны на внешней поверхности гильз цилиндров, или скоплений микрополостей на внешних кромках и местах приварки лопастей гребных винтов судов на подводных крыльях (рис. 2.7).

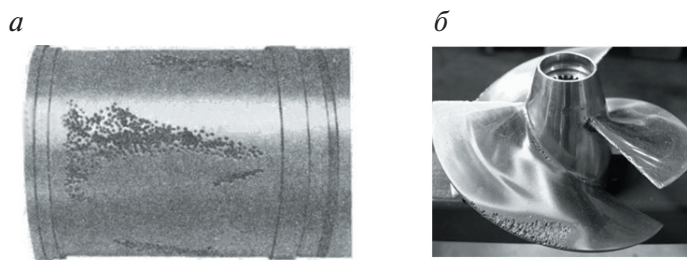


Рис. 2.7. Внешний вид гильзы дизеля (а) и гребного винта катера на подводных крыльях (б), изношенных кавитацией

Высокая способность марганцевого аустенита к деформационному упрочнению была использована при разработке хромомарганцевых метастабильных аустенитных сталей (МАС) с высокой кавитационной стойкостью. Богачев И. Н. с сотрудниками показали, что наибольшим сопротивлением кавитационному разрушению обладают МАС на хромомарганцевой основе, которые под влиянием микроударов быстро текущей воды претерпевают мартенситное превращение на рабочей поверхности деталей, обуславливая интенсивное упрочнение и высокую кавитационную стойкость.

На основе принципа метастабильности хромомарганцевого аустенита в УрФУ разработана группа кавитационно-стойких МАС 30X10Г10, 03X14АГ12М и др. (табл. 2.1), обладающих активной кинетикой образования мартенсита при деформации и высокой способностью к упрочнению. Эти стали должны подвергаться относительно несложной термообработке — закалке (аустенитизации) от 1050–1100 °С в воде. Хромомарганцевоникелевые МАС имеют лучшие пластические свойства, коррозионную стойкость, технологические свойства и свариваемость, чем сталь 30X10Г10, за счет некоторого снижения кавита-

ционной стойкости. В одинаковых условиях кавитационная стойкость стали 20X12H3Г4 приближается к стойкости стали 30X10Г10, а стойкость стали 03X13H3Г4 — к стойкости стали 03X14АГ12М. По кавитационной стойкости метастабильные аустенитные стали также на порядок превосходят относительно стабильную в этих условиях сталь 12X18H10Т (рис. 2.8). Аналогичная зависимость характерна и для стойкости при гидроабразивном изнашивании.

Таблица 2.1

Механические свойства и кавитационная стойкость аустенитных сталей

Марка стали	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ	<i>KCU</i> , МДж/м²	Потери массы за 10 ч испытаний, мг
	МПа		%			
12X18H10T	330	620	44	52	2,4	1250
30X10Г10	340	790	16	9	1,2	15
03X14АГ12М	450	955	45	49	2,8	150
20X13H3Г4	320	1530	24	15	2,3	40

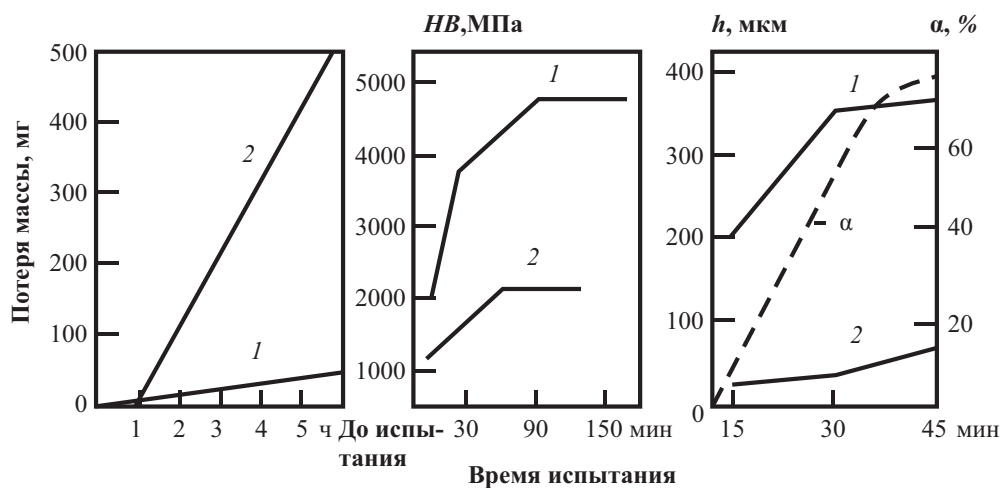


Рис. 2.8. Потеря массы, твердость поверхности HB, глубина наклепанного слоя h закаленных сталей 30X10Г10 (1) и 12X18H10Т (2) и количество α -мартенсита на поверхности образцов стали 30X10Г10 (α) в процессе кавитационного воздействия при испытании на струеударном стенде (по И. Н. Богачеву и Р. И. Минцу)

Представления об использовании метастабильной структуры для повышения служебных свойств были развиты впоследствии в работах многих исследователей, применивших синергетические представления в материаловедении и показавших всеобщность явления структур-

ной приспособляемости материалов, самоорганизации структуры, направленной на уменьшение интенсивности повреждающих факторов внешнего воздействия. МАС являются наиболее яркими представителями материалов, проявляющих свойства синергетических систем. Повышение износостойкости и усталостной прочности таких сталей в сравнении со стабильными аустенитными сталями близкого состава достигается за счет проявления эффектов от развития ДМП в метастабильном аустените в процессе воздействия на поверхность абразивных частиц и циклического нагружения — интенсивного упрочнения при нагружении и создания сжимающих напряжений на поверхности вследствие образования мартенситных фаз и релаксации напряжений в момент фазовых превращений (микроПНП-эффекта (ПНП — пластичность, наведенная превращением)).

МАС целесообразно использовать в условиях, когда рабочая температура среды не превышает $M_d \gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ -превращений. В противном случае кавитационная, абразивная, гидроабразивная стойкость и циклическая прочность будут снижаться, что видно на примере сталей 03X14AG12M, 20X13H3G4 (табл. 2.1), однако они лучше обрабатываются резанием в сравнении со сталью 30X10Г10.

Кавитационно-стойкие МАС используют для изготовления литых деталей гидромашин (лопасти гидротурбин и гидронасосов, судовых гребных винтов) и других деталей, работающих в условиях изнашивания при кавитации, а также выпускают в виде листа и электродов для защитной облицовки или наплавки деталей из углеродистых сталей. Однако изготовление гребных винтов судов на подводных крыльях, имеющих сложную геометрическую форму в цельнолитом или сварно-литом вариантах из кавитационно-стойких МАС, не получило широкого распространения вследствие технологических трудностей. Поэтому наплавка и облицовка лопастей гидротурбин, насосов и других деталей, в т. ч. методом сварки взрывом, служит основным технологическим способом использования кавитационно-стойких МАС.

Принцип Богачева — Минца как научная основа решения проблемы повышения контактной прочности металлических сплавов, выбора материалов и режимов их термической обработки оказался применим и для других видов изнашивания. Однако применительно к каждому виду механического изнашивания необходимо использовать правило метастабильности аустенита: $M_n < 20^\circ\text{C}$ или температуры эксплуатации во избежание появления хрупких кристаллов мартенсита охлаж-

дения, $M_d > 20$ °С для обеспечения образования мартенсита деформации. Конкретное наполнение этого правила должно быть разным.

Преимущества МАС системы Fe—Mn—Cr—C перед стабильными сталями близкого состава могут быть реализованы тогда, когда конкретным условиям эксплуатации (усталостное, абразивное, ударно-абразивное изнашивание, гидро- и газоабразивное, эрозионное, кавитационное, циклическое контактно-ударное воздействие) соответствует сталь определенного химического состава. При правильном выборе состава хромомарганцевого аустенита (сочетания углерода, хрома и марганца) обеспечивается благоприятная кинетика мартенситных превращений, и достигаются свойства образующихся мартенситных фаз для реализации микро-ПНП эффекта и сильного упрочнения микрообъемов рабочей поверхности деталей машин. Например, для сталей, способных успешно противостоять абразивному изнашиванию, содержание углерода в метастабильном аустените должно быть не менее 0,6 %, чтобы их износостойкость при испытании по закреплённому абразиву достигла таковой для износостойкости стали 110Г13Л. Сталь 30Х10Г10Л, имея на порядок более высокую, чем сталь 110Г13Л, кавитационную стойкость, уступает этой стали по абразивной износостойкости вследствие невысокого содержания углерода в мартенсите деформации, что не обеспечивает достаточно высокого уровня упрочнения рабочей поверхности, несмотря на активную кинетику деформационных мартенситных превращений (ДМП).

2.4. Усталостное изнашивание

Контактная усталость при трении происходит в результате накопления повреждений и разрушения поверхности под влиянием циклических контактных нагрузок, вызывающих появление «ямок» выкрашивания (питинг). Усталостное изнашивание проявляется при трении качения или реже — качения с проскальзыванием. Так, контактную усталость можно наблюдать в тяжело нагруженных зубчатых и червячных передачах, подшипниках качения, рельсах и бандажах подвижного состава железнодорожного транспорта и т. д. При механическом взаимодействии деталей в поверхностных слоях материала возникает сложное напряженное состояние: перед выступом шероховатости

образуется зона сжатия материала, а за выступом — зона растяжения. В результате такого знакопеременного циклового воздействия в микрообъемах материала накапливаются повреждения, снижающие его прочность. Накопление усталостных микроповреждений ведет к разрушению поверхностных слоев материала в зоне трения. Изнашивание поверхности трения или отдельных ее участков в результате повторного деформирования микрообъемов материала, приводящего к возникновению трещин и отделению (выкрашиванию) частиц, называется *усталостным изнашиванием*. Причины усталостного разрушения поверхностного слоя заключаются в знакопеременном характере напряжений в зоне контакта металлов при трении (рис. 2.9). Материал кольца перед фронтом микронеровности будет испытывать сжимающие напряжения, а после пятна контакта — растягивающие. Поскольку контакт поверхностей трения имеет дискретный характер, пятно контакта испытывает многократное воздействие (механическое, тепловое) других пятен контакта. Постепенное повышение плотности дефектов кристаллического строения приводит к образованию микротрещин и локальному разрушению поверхностного слоя. Усталостное изнашивание — это процесс разрушения поверхностей деталей от внутренних напряжений, пластических деформаций, накопления плотности дефектов кристаллического строения до критического значения. При этом на поверхности трения образуются микротрещины, трещины, единичные и групповые ямки. Интенсивность усталостного изнашивания зависит от величины нагрузки, ее длительности и количества изменений направления этой нагрузки.

Впервые на усталостную природу изнашивания при трении скольжения указал Д. В. Конвисаров (Уральский индустриальный институт). Причины усталости поверхностного слоя деталей он усматривал в повторных или знакопеременных движениях деталей машин. Изнашивание твердых тел при трении сходно с разрушением их от усталости, а разница между обоими разрушительными процессами заключается в том, что за изнашиванием можно легко проследить, усталость же металлов проявляется почти всегда внезапной аварией.

Экспериментально доказана знакопеременность напряжений в зоне контакта деталей при трении. На рис. 2.9 приведена схема нагружения элементов поверхности вращающегося кольца при трении о неподвижный образец. Материал кольца перед неподвижным образцом испытывает напряжение сжатия, а после контакта этот же ма-

териал растянут. Сжатые участки кольца обозначены знаком минус, растянутые — знаком плюс. Таким образом, за один оборот материал кольца при наличии одного неподвижного образца будет испытывать одно сжатие и одно растяжение. При этом напряжения элементов поверхности неподвижного образца за период полного оборота кольца не изменяются.

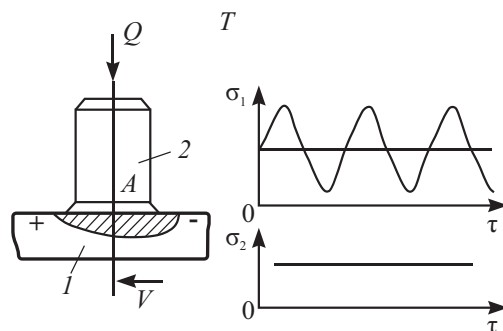


Рис. 2.9. Схема нагружения элементов поверхности кольца:

I — кольцо; 2 — образец; Q — напряжение на площадке A кольца; a_2 — напряжение на площадке A неподвижного образца; τ — время

Механизм усталостного изнашивания материала объясняют по-разному. Большое распространение в настоящее время получила теория усталостного изнашивания, разработанная группой советских ученых под руководством И. В. Крагельского. Согласно этой теории, частицы износа поверхности трения могут отделяться и без внедрения шероховатостей одной детали в поверхностные слои другой детали сопряжения. Изнашивание может происходить вследствие усталости микрообъемов материала, возникающей под действием многократных сжимающих и растягивающих усилий, не превышающих критические $P_{кр}$. В результате циклического воздействия нагрузки на поверхности детали возникают усталостные микротрещины, которые, постепенно смыкаясь, приводят к образованию частиц износа. Такое явление получило название фрикционно-контактной усталости. Данный вид изнашивания происходит в результате механических воздействий при трении двух соприкасающихся поверхностей, например в шестеренных передачах зубьев шестерен (трение зуб о зуб), в червячных передачах — поверхности червяка и червячного колеса, в подшипниковых соединениях — цапфы и втулки (подшипники скольжения).

В процессе эксплуатации механизмов их отдельные сборочные единицы (узлы трения) изнашиваются, т. е. теряют свои первоначальные свойства.

Все трущиеся детали механизмов в соединениях имеют мельчайшие неровности, высота которых зависит от шероховатости поверхности. Высота этих неровностей достигает 6–10 мкм. Трущиеся поверхности изнашиваются вследствие соприкосновения этих неровностей. Интенсивность изнашивания трущихся поверхностей зависит также от свойств смазочного материала и степени герметизации соединений сборочных единиц.

Усталостное изнашивание неустранимо, однако профилактические меры, предусмотренные системой планово-предупредительного технического обслуживания и ремонта, способствуют резкому снижению этого вида изнашивания. Особенно эффективно замедление процесса усталостного изнашивания достигается в результате упрочнения рабочих поверхностей в результате поверхностной пластической деформации и закалки, создающих остаточные напряжения сжатия. Процесс усталостного изнашивания обычно связан с многократно повторяющимися циклами напряжений в контакте качения или скольжения. В процессе взаимодействия поверхностей в их верхних слоях возникают поля напряжений. Схема распределения напряжений при контакте цилиндра с плоскостью, рассчитанная методом конечных элементов, приведена на рис. 2.10.

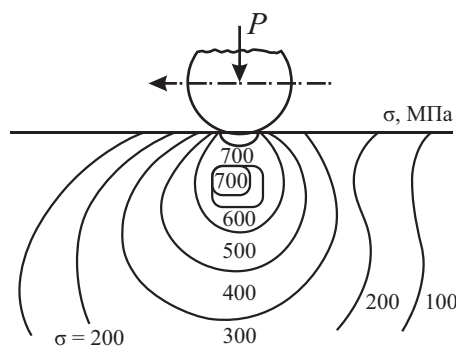


Рис. 2.10. Схема распределения касательных напряжений, возникающих при качении цилиндра по плоскости

В процессе трения на рабочей поверхности деталей возникают максимальные напряжения сжатия, а по глубине материала детали распро-

страняются направленные касательные напряжения, максимум которых концентрируется на некотором расстоянии от точки их контакта.

Интенсивность усталостного изнашивания определяется следующими факторами: наличием остаточных напряжений в поверхностях концентраторов напряжений (окислы, другие крупные включения, дислокации); качеством поверхности (микрорельеф, загрязнения, вмятины, царапины, задиры, канавки, риски); распределением нагрузки в сопряжении (упругие деформации, перекосы деталей, зазоры); видом трения (качения, скольжения или качения с проскальзыванием); наличием и типом смазочного материала.

Далее опишем процесс усталостного изнашивания (рис. 2.11, а). При вступлении в контакт двух поверхностей в относительном движении сначала на трущейся поверхности образуются усталостные микротрещины 2. Смазочный материал, попадая в микротрещины, способствует их расклиниванию 3 и выкрашиванию 4 частиц металла, в результате чего на поверхности детали появляются мелкие ямки (питтинг). Число этих ямок и одновременно их размеры увеличиваются до тех пор, пока растущие контактные напряжения на рабочих поверхностях не приведут к пластической деформации и интенсивному изнашиванию детали. Толщина разрушенного слоя металла примерно соответствует глубине распространения под поверхность максимальных касательных напряжений.

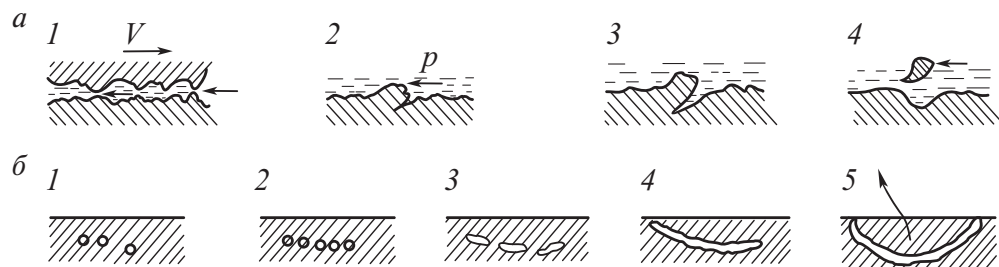


Рис. 2.11. Схема усталостного изнашивания поверхности при $P < P_{кр}$ и возникновении первичной микротрещины на поверхности (а) и микротрещины в подповерхностном слое (б) (по В. А. Зорину)

В зависимости от соотношения нормальной и тангенциальной составляющих сил в контакте, а также структуры материала и его физико-механических свойств первичная микротрещина может зародиться и в подповерхностном слое. В таком случае механизм разрушения

поверхности можно представить следующим образом (рис. 2.11, б): 1 — зарождаются подповерхностные дислокации; 2 — идет процесс накопления дислокаций; 3 — образуются полости; 4 — слияние полостей ведет к образованию микротрещин, параллельных поверхности трения; 5 — при достижении микротрещиной некоторой критической длины отделяется частица износа. Подповерхностные микротрещины зарождаются, как правило, у деталей с неоднородной структурой материала; азотированных, цементованных, поверхностно закаленных, а также у деталей, работающих при очень больших контактных напряжениях.

Участки рабочих поверхностей деталей, поврежденные усталостным изнашиванием, имеют две типичные области: относительно гладкого материала, которая формируется по краям в результате трения двух сторон микротрещины при ее раскрытии и смыкании (в этой области металл обычно имеет специфическую окраску вследствие воздействия масла, пыли и продуктов коррозии), и шероховатой поверхности «рваного» металла, расположенной на дне раковины.

Способность детали сопротивляться усталостному изнашиванию обычно оценивают временем работы t в заданных условиях до отрыва частиц металла. Наибольшее влияние на развитие усталостного изнашивания оказывают условия трения (нагрузка и температура), свойства материалов (твердость и шероховатость поверхности) и применяемые смазочные материалы. Сопротивление материалов питтингу прямо пропорционально твердости рабочей поверхности и вязкости смазочного материала. С возрастанием нагрузки N на рабочую поверхность деталей наработка до возникновения усталостного выкрашивания уменьшается (рис. 2.12).

Смазочные материалы уменьшают напряжение, действующее в контакте, в результате чего процесс образования микротрещин в начальной стадии идет медленнее. Усталостное изнашивание наиболее часто наблюдается в условиях высоких контактных нагрузок при одновременном качении и проскальзывании одной поверхности под другой. В таких условиях работают, например, зубчатые колеса, тяжело нагруженные шестерни и подшипники качения, зубчатые венцы.

Усталостное изнашивание материала может быть умеренным и прогрессирующим. Усталостное изнашивание рабочих поверхностей деталей сопровождается повышением уровня шума и вибрации по мере увеличения износа.

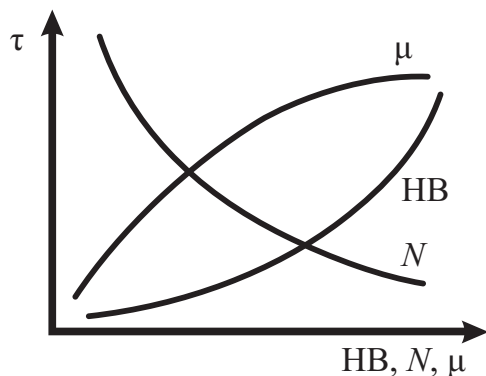


Рис. 2.12. Зависимость времени наработки (τ) до появления усталостного выкрашивания от вязкости смазочного материала (μ), твердости материала (HB) и нагрузки (N)

Обычное умеренное усталостное изнашивание для большинства пар трения не является опасным, и детали, имеющие усталостные повреждения, могут использоваться длительное время. Прогрессирующее изнашивание возникает при высоких контактных напряжениях, сопровождается интенсивным разрушением поверхности и может привести к поломке деталей (например, зуба шестерни).

При интенсивном абразивном изнашивании рабочих поверхностей их разрушение происходит быстрее, чем образование усталостных трещин. Поэтому, как правило, в таких случаях питтинг не наблюдается.

2.5. Изнашивание при схватывании и заедании

Схватывание при трении — приваривание, сцепление, местное соединение двух твердых тел под действием молекулярных сил. При этом образуются прочные металлические связи в зонах непосредственного контакта поверхностей. В местах схватывания исчезает граница между соприкасающимися телами, происходит сращивание одно- и разноименных металлов. Изнашивание при заедании происходит в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность. Оно сопровождается прочным соединением контактирующих участков поверхностей тре-

ния. В процессе трения относительное перемещение поверхностей приводит к вырыву частиц металла одной поверхности и наволакиванию их на другую более твердую поверхность.

Схватывание — это процесс недопустимого повреждения, которое развивается в результате возникновения локальных металлических связей между поверхностями, деформации этих связей и разрушения с отделением частиц металла или их налипанием на поверхность. Металлические связи возникают вследствие интенсивной деформации поверхности. Как сказано в подглаве 1.1, при механических видах изнашивания металлических материалов основным первичным процессом, обуславливающим возникновение износа, является упругопластическая деформация поверхностных слоев материалов, приводящая к возникновению в поверхностных слоях большого количества дефектов кристаллического строения (точечные дефекты, дислокации, дефекты упаковки, двойники), сильной фрагментации зерен, текстурированию металла, а также к образованию ультрамелкокристаллической структуры с размером кристаллитов 0,01–1,00 мкм. Схватывание облегчается в случае трения одноименных поверхностей (например, медь — бронза, бронза — латунь).

На явлении схватывания при совместном пластическом деформировании металлов основаны технологические процессы холодной сварки металлов и получения биметаллов методом холодной прокатки. Если при технологических процессах соединения металлов методом холодной сварки и плакирования схватывание используется намеренно, то при резании металла, холодной обработке давлением и при трении схватывание является вредным сопутствующим процессом. Схватывание, при котором имеет место задир, является одним из наиболее опасных и относится к катастрофическим видам износа. При этом происходит разрушение поверхности, и трущиеся детали выходят из строя.

Различают схватывание I рода (холодный задир) и II рода (горячий задир) (рис. 2.13). **Холодный задир** происходит при трении с небольшими скоростями относительного перемещения (до 0,5–0,6 м/с) и удельными нагрузками, превышающими σ_t , при отсутствии смазочного материала и защитной пленки окислов. Развивается на глубину до 0,5 мм. Средняя температура поверхности при этом достигает не более 100 °С. Возникает при трении скольжения с малыми скоростями и при небольшой нагрузке при отсутствии на поверхности смазки или окисной пленки. Протекает при трении вследствие сближения ювенильных участков в точках контакта поверхностей на расстояние действия межатомных

сил. В этих точках активизируются источники дислокаций; перемещение и взаимодействие последних приводит к повышению количества точечных дефектов кристаллического строения. Это вызывает диффузионный обмен атомами между поверхностями, в результате чего возникают металлические связи с взаимной достройкой электронных уровней объединяемых атомов. Накопление дефектов кристаллического строения и взаимодействие их между собой приводят к возникновению в поверхностном слое материалов многочисленных субмикро- и микротрещин, развитие которых в конечном итоге обуславливает отделение фрагментов материала — продуктов изнашивания (частиц износа). Такие «мостики» холодной сварки существуют считанные доли секунды, после чего они разрушаются тангенциальными напряжениями при трении. Поскольку место сварки упрочнено наличием большого количества дефектов кристаллического строения, разрушение происходит в другой точке, немного вглубь от поверхности. Таким образом, частица металла отрывается с одной поверхности и переносится на другую.



Рис. 2.13. Внешний вид рабочей поверхности коленчатого вала тяжелого грузовика после изнашивания схватыванием I рода и глубинным вырыванием при трении скольжения

Горячий задира, наоборот, имеет место при трении скольжения с большими скоростями (более 0,6 м/с) и нагрузками, когда в зоне контакта температура резко повышается (до 500–1500 °С). Механизм возникновения данного типа разрушения такой же, как и у схватыва-

ния I рода. Оно возникает при трении скольжения с большими скоростями и нагрузкой, когда существенно повышается температура в месте контакта. При нагреве металл интенсивно размягчается, вследствие чего облегчается возникновение металлических связей между поверхностями. В очень тяжелых условиях трения в месте схватывания происходит оплавление поверхности, т. е. температура в зоне трения достигает 1500 °С и выше. Схватывание II рода происходит при сухом трении или граничной смазке, когда высокое давление разрушает защитные вторичные пленки, а высокая температура служит причиной десорбции смазочного материала с поверхности.

При схватывании I рода коэффициент трения составляет 0,5–4,0, толщина разрушающегося слоя — до 3–4 мм, а при схватывании II рода — соответственно 0,10–1,0 и до 1,0 мм.

При трении качения в условиях граничной смазки также наблюдается изнашивание, вызванное схватыванием материалов и заеданием. Схватывание происходит при местном разрыве смазочной пленки и установлении металлического контакта, что возможно не только при прекращении подачи смазочного материала, но и вследствие общей перегрузки сопряжения, резкого повышения температуры масла в поверхностных слоях, местных температурных всплесков и т. д.

2.6. Окислительное изнашивание

Окислительное изнашивание (ОИ) является проявлением структурного приспособления металлов при трении. ОИ протекает в условиях нормального процесса трения и заключается в образовании вторичных пленок твердых растворов и химических соединений металла с кислородом и их удалении с поверхности трущихся деталей. Главная особенность ОИ состоит в том, что скорость разрушения пленок не превышает скорости их образования. Пластическая деформация активизирует поверхность, стимулируя процесс окисления; деформационные и окислительные процессы протекают в поверхностных слоях толщиной 10–100 нм. Окислительный износ имеет место в отсутствие агрессивной среды, при нормальной или повышенной температурах без смазки или при ее недостатке. Скорость изнашивания при ОИ мала благодаря защитному действию окисных пленок, предотвращающих

поверхности от схватывания. Под влиянием повторной пластической деформации пленки разрушаются, и если пленки твердые, то их частицы могут быть абразивом, царапающим поверхность. Разрушенные окисные пленки очень быстро восстанавливаются, при этом процесс восстановления пленок усиливается под влиянием повышения температуры в зоне трения. Окислительное изнашивание характеризуется протеканием одновременно двух процессов — пластической деформации малых объемов металла поверхностных слоев и проникновения кислорода воздуха в деформированные слои. В первой стадии происходит разрушение и удаление мельчайших твердых частиц металла из непрерывно образующихся (от проникновения кислорода) пленок. Для второй стадии характерно образование и выкрашивание пластически недеформирующихся хрупких окислов.

Интенсивность изнашивания зависит от окислов, препятствующих схватыванию поверхностей. При обычных температурах окисление поверхностей активизируется пластической деформацией, поэтому необходимо создавать поверхности трения с высокой твердостью. Повышение температуры способствует росту окисных пленок, а вибрация разрушает их.

Окислительное изнашивание возникает при трении скольжения и трении качения. При трении скольжения оно становится ведущим, а при трении качения — сопутствующим другим видам изнашивания. Проявляется этот вид изнашивания при сравнительно невысоких скоростях скольжения и небольших удельных нагрузках, а также на таких деталях, как шейки коленчатых валов, цилиндры, поршневые пальцы и др. Интенсивность изнашивания можно уменьшить, сменив смазочный материал, понизив рабочую температуру узла трения.

ОИ проявляется при следующих скоростях скольжения: при сухом трении для отожженных сталей — до 4 м/с и для закаленных сталей — до 7 м/с; при граничном трении — до 25 м/с. При этом удельная нагрузка не должна превышать значений, при которых разрушаются масляные пленки или окисные слои. Температура в зоне трения ограничивается величиной 200 °С; при более высокой температуре происходит размягчение металла и десорбция смазки с поверхности, т. е. активизируются процессы, которые приводят к схватыванию II рода. В зависимости от условий трения и свойств материалов, составляющих пару трения, ОИ может проявляться в двух формах. Первая форма состоит в образовании подвижных, довольно пластичных пленок

вторичных структур, которые перемещаются по поверхности и заполняют впадины и неровности (структуры 1-го рода) (рис. 2.14). Поверхность становится очень гладкой без значительных признаков рельефа (рис. 2.15).

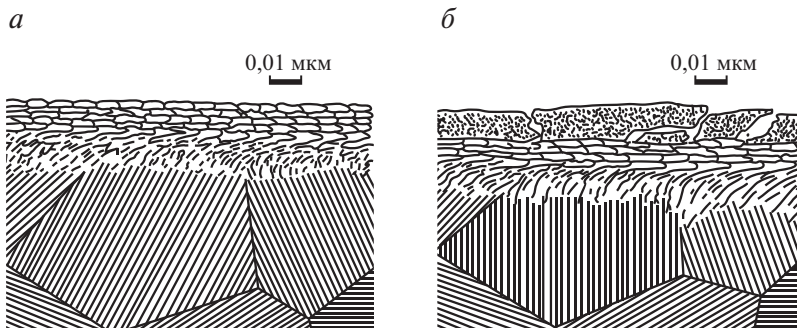


Рис. 2.14. Схема строения поверхностных слоев при ОИ:

а — вторичные структуры 1-го рода, *б* — вторичные структуры 2-го рода



Рис. 2.15. Состояние поверхности трения цапфы шестерни гидроцилиндра, покрытой пленками 1-го рода:

а — внешний вид цапфы; *б* — микрофотография, $\times 300$; *в* — субмикрофотография, $\times 12000$

Вторичные структуры 1-го рода представляют собой твердые метастабильные растворы кислорода в металле, а также эвтектики разной степени насыщения. Твердость вторичных структур 1-го рода превышает твердость основы. Изнашивание структур 1-го рода происходит путем перемещения тонких пленок по поверхности контакта с последующим выносом их с поверхности (рис. 2.16). Особенностью таких пленок является отсутствие четкой границы между ними и основным металлом.

Другая форма ОИ связана с образованием твердых и хрупких пленок на основе химических соединений кислорода с металлом — вторичных структур 2-го рода, которые имеют твердость, значительно

превышающую твердость основного металла. Поверхность трения отличается гетерогенностью строения с наличием участков, на которых прошло разрушение и удаление пленок (рис. 2.17).

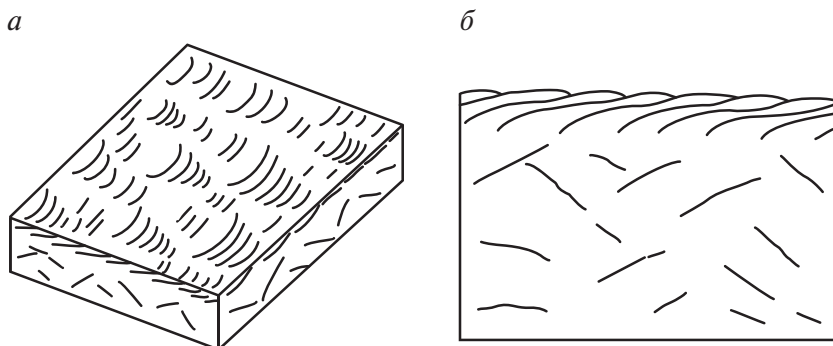


Рис. 2.16. Схема образования и выноса с поверхности подвижных вторичных структур 1-го рода:

a — в плане; *б* — в сечении

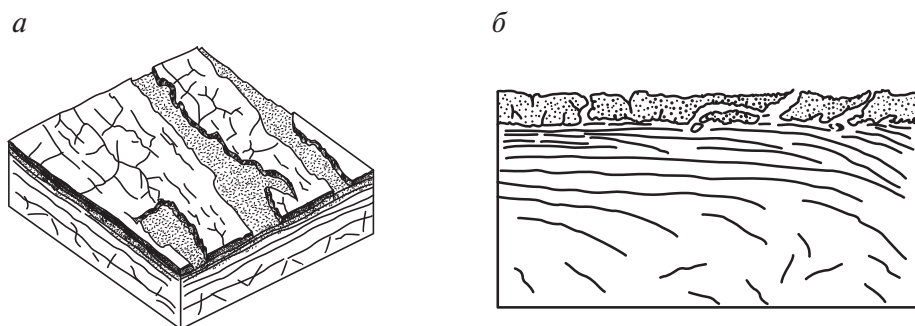


Рис. 2.17. Схема образования и выноса с поверхности хрупких вторичных структур 2-го рода:

a — в плане; *б* — в сечении

Механизм изнашивания защитных слоев 2-го рода состоит в возникновении в пленках отдельных субмикротрещин, которые затем развиваются и приводят к отслоению пленок с поверхности металла. Разрушению оказывает содействие повышенная хрупкость структур 2-го рода, напряжения в слое, обусловленные разным удельным объемом окисла и металла, а также отсутствие достаточно прочного соединения пленки с основой (на что указывает четкая граница раздела между окисным слоем и основой). Основные характеристики вторичных структур приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Характеристики вторичных структур при окислительном изнашивании

Характеристика	Форма вторичных структур	
	1-го рода	2-го рода
Класс чистоты поверхности	10–14	9–13
Глубина слоя, который разрушается	10–30 нм	10–100 нм
Температура поверхностного слоя	До 100 °С	До 200 °С
Повышение твердости относительно основного металла	2–3 раза	4–5 раз
Коэффициент повышения объема поверхностного слоя	1,0–1,05	1,05–1,08
Разрушение поверхностного слоя	Вязкое	Вязкохрупкое
Скорость изнашивания	До 0,1 мкм/ч	До 0,05 мкм/ч

Структуры 1-го рода чаще возникают на термообработанных сталях и чугунах, в особенности после дополнительного применения упрочняющих технологий. Повышенная прочность сталей и чугунов предопределяет их малую активацию (т. е. пластическую деформацию) во время трения. Повышенной склонностью к образованию пленок 2-го рода отличаются цветные сплавы. Благодаря низкой прочности и повышенной химической активности цветные сплавы достаточно легко деформируются и интенсивно пассивируются, соединяясь с кислородом и другими компонентами среды. Возникновение пленок 2-го рода также характерно и для твердых подшипниковых сталей в условиях трения качения (рис. 2.18).



Рис. 2.18. Вид поверхности трения подшипника гидронасоса, покрытой пленками 2-го рода:

а — внешний вид цапфы; *б* — микрофотография, $\times 300$; *в* — субмикрофотография, $\times 20000$

Образование пленок того или другого рода зависит от типа материалов, наличия и типа смазки, а также условий трения. Если трение происходит при малых скоростях скольжения и малых нагрузках, на поверх-

ности возникают вторичные структуры 1-го рода. По мере возрастания удельной работы трения (вычисляемой как $A = PV/\mu$) повышается интенсивность структурно-термической активации поверхности и осуществляется переход от структур 1-го рода к структурам 2-го рода; при этом дальнейший рост A приводит к повышению содержания кислорода в соединении, окислы становятся более стабильными, а затем к образованию соединений стехиометрического состава (на сплавах железа — Fe_2O_3 , Fe_3O_4). Такое изменение строения защитных вторичных слоев наблюдается при переходе от граничного трения к сухому. Наличие масляной пленки между поверхностями при граничном трении обеспечивает перераспределение нагрузки и более равномерную деформацию поверхности; последняя сосредоточивается в очень тонких поверхностных слоях, приводя к их текстурированию и аморфизации (см. явление структурного приспособления металлов при трении в подглаве 3.5). Активированные таким образом поверхностные слои взаимодействуют с кислородом (пассивируются), а степень этого взаимодействия контролируется экранирующим действием смазочного материала. Масло препятствует доступу кислорода к поверхности, поэтому в активированных слоях металла возникают ненасыщенные кислородом структуры: метастабильные твердые растворы и тонкие эвтектики (подвижные, хорошо сцепленные с поверхностью пленки 1-го рода).

При сухом трении за счет сил адгезии усиливается деформация поверхности, т. е. повышается ее активация, что стимулирует процесс пассивации (насыщение поверхности кислородом), при этом ничто не препятствует доступу кислорода к месту контакта.

В результате возникают защитные слои 2-го рода, более насыщенные активными компонентами среды. Сначала, при недостаточно большом уровне энергии трения, структуры 2-го рода представляют собой химические соединения нестехиометрического состава и имеют хорошие защитные свойства. По мере повышения давления или скорости скольжения количество кислорода в пленках возрастает, т. е. они становятся более пассивированными, что приводит к возрастанию удельного объема пленок. В них возникают напряжения, что вызывает ухудшение сцепления с основным металлом. Сами пленки становятся толстыми, рыхлыми, падает их прочность, возрастает хрупкость; они довольно легко разрушаются и удаляются с поверхности. Постепенно, с ростом работы трения, структуры 2-го рода теряют защитные качества, и сам факт их образования вызывает повышение интенсивности

окислительного изнашивания. В табл. 2.3 приведены данные относительно свойств защитных структур, возникающих на стали 45 при граничном и сухом трении.

Таблица 2.3

**Свойства защитных структур, возникающих на стали 45
при граничном и сухом трении**

Характеристика структуры	Граничное трение (структуры 1-го рода)	Трение без смазочного масла (структуры 2-го рода)
Толщина пленки	0,01–0,03 мкм	10–100 мкм
Содержание кислорода	1–10 %	20–30 %
Тип соединения, внешние признаки	Твердые растворы и эвтектики; стекловидные, бледно-матовые; субмикротрещины, волнистость поверхности; класс чистоты: 12...14 — на пленке, 9...12 — под пленкой	Оксиды, цвет окислов металла, трещины; класс чистоты: 9...10 — на пленке, 6...7 — под пленкой
Скорость изнашивания	Не более 0,01 мкм на 1000 м пути трения	10 мкм на 1000 м пути трения
Микротвердость	1000–1200 HV	800–900 HV

Окислительное изнашивание фиксируют на калибрах, деталях шарнирно-болтовых соединений, металлических колесах фрикционных передач и т. п. (рис. 2.19).

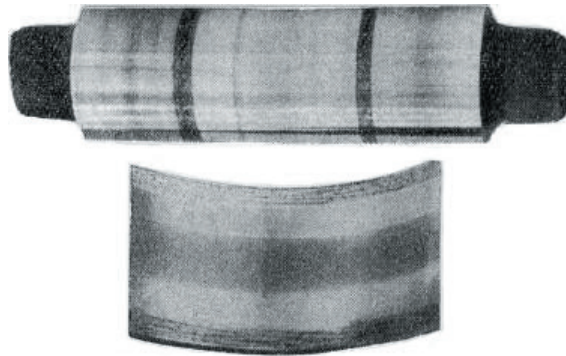


Рис. 2.19. Внешний вид деталей, работающих в условиях окислительного износа

Кроме окислительных пленок, защитные пленки могут иметь неокислородное происхождение, т. е. быть по составу серовитными, сульфидными, фосфидными и т. п. Третья разновидность механиз-

мов окислительного изнашивания — механохимическая форма абразивного изнашивания. Она имеет общие черты с чисто абразивным изнашиванием (т. е. режущее, царапающее воздействие твердых частиц), но отличается от него тем, что абразивные частицы внедряются неглубоко, поэтому они в состоянии удалить с поверхности не микрочастицы металла, а лишь тонкую окисную пленку. Следовательно, потеря массы детали от такого вида изнашивания будет минимальна.

2.7. Водородное изнашивание

Водородное изнашивание связано с присутствием водорода в поверхностном слое металлических деталей узлов трения. Как один из процессов разрушения металлических поверхностей при трении водородное изнашивание установлено Д. Н. Гаркуновым и А. А. Поляковым. Водородное изнашивание зависит от концентрации водорода в поверхностных слоях трущихся деталей. Водород выделяется из материалов деталей пары трения или из окружающей среды (смазочный материал, рабочая жидкость — топливо, вода и др.) и ускоряет изнашивание. Водородное изнашивание вызывается следующими процессами, происходящими в зоне трения:

- интенсивным выделением водорода при трении в результате трибодеструкции водородсодержащих материалов, создающей источник непрерывного поступления водорода в поверхностный слой стали или чугуна;
- адсорбцией водорода на поверхностях трения;
- диффузией водорода в деформируемый слой металла, скорость которой определяется градиентами температур и напряжений, что приводит к накоплению водорода в процессе трения;
- особым видом разрушения поверхности, связанного с одновременным развитием большого числа зародышей трещин по всей зоне деформирования и с эффектом накопления водорода, характерным для мгновенного разрушения и образования мелкодисперсного порошка изнашиваемого материала.

Установлены два вида изнашивания металлических деталей под влиянием водорода — изнашивание диспергированием и изнашивание разрушением.

При *водородном изнашивании диспергированием* на поверхностях трения не наблюдается задигов, вырывов, заметного переноса материала с одной поверхности трения на другую. Поверхности трения могут иметь блеск и очень мелкие царапины, риски, которые не видны невооруженным глазом, и направлены вдоль направления движения.

Водород в зависимости от его количества в поверхностном слое усиливает диспергирование металла. Установлено, что при незначительном наводороживании износостойкость образцов стали 45 несколько повышается, а при дальнейшем наводороживании — снижается (рис. 2.20). Это объясняется тем, что при незначительном наводороживании несколько повышается твердость стали.

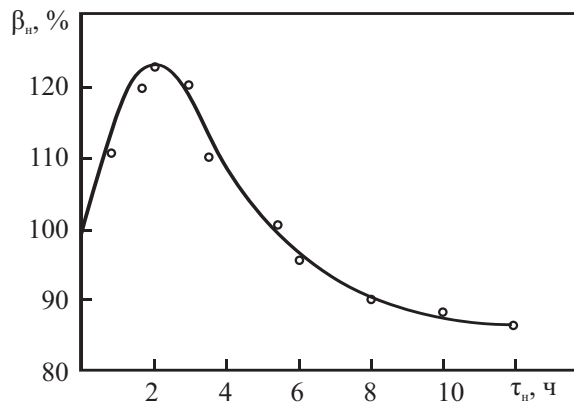


Рис. 2.20. Зависимость относительной микротвердости стали 45 от продолжительности наводороживания

Как видно из рис. 2.20, микротвердость в течение первых полутора часов наводороживания увеличивается, а затем снижается и становится меньше исходной. Это свидетельствует о том, что при насыщении стали водородом происходит разрыхление поверхности слоя и, как следствие, снижение его износостойкости (рис. 2.21).

Водородное изнашивание разрушением отличается от вышеописанного вида изнашивания тем, что поверхностный слой металла (чугуна или стали) толщиной до 1–2 мкм при определенных условиях разрушается мгновенно. Это происходит тогда, когда в поверхностном слое накапливается достаточно большое количество водорода. Накоплению водорода способствует десорбция смазочного материала из поверхностного слоя металла при трении, поскольку водород получает

возможность занять большое число адсорбционных центров на поверхности. В процессе трения концентрация водорода в стали непрерывно возрастает. Водород проникает в зародышевые трещины, полости, межкристаллитные границы и другие места.

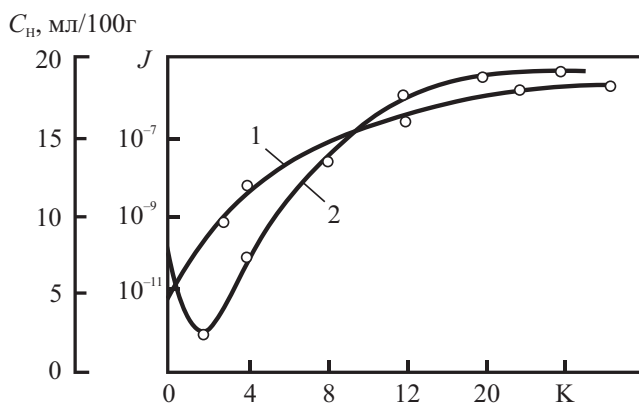


Рис. 2.21. Зависимость количества поглощенного водорода C_n (1) и интенсивности изнашивания J (2) от продолжительности наводороживания

В условиях трения происходит периодическое деформирование поверхностного слоя и объем дефектных областей (полостей) изменяется. Поступающий в полости водород молизуется и, не имея возможности выйти обратно при уменьшении объема, стремится расширить полость, создавая высокое напряжение.

2.8. Изнашивание при фреттинг-коррозии

Фреттинг-коррозия — это процесс разрушения плотно контактирующих поверхностей пар металл—металл или металл—неметалл при их колебательных перемещениях в условиях воздействия коррозионной среды.

Для возбуждения фреттинг-коррозии достаточны перемещения поверхностей с амплитудой 0,025 мкм. Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язв и продуктов коррозии в виде налета, пятен и порошка. Этому виду изнашивания подвержены не только углеродистые, но и коррозионно-стойкие

стали в парах трения сталь—сталь (могут быть как одноименные, так и разноименные), сталь—олово или алюминий, сурьма, а также чугуны и многие другие пары трения. Фреттинг-коррозия развивается в болтовых соединениях, посадочных поверхностях подшипников качения, листовых рессорах, шестернях, муфтах и т. д. Она возникает в результате непрерывного разрушения защитной оксидной пленки в точках подвижного контакта.

Вследствие малой амплитуды перемещения соприкасающихся поверхностей повреждения сосредоточиваются на небольших площадках действительного контакта. Продукты изнашивания не могут выйти из зоны контакта, в результате чего возникает высокое давление и увеличивается их абразивное действие на основной металл.

При фреттинг-коррозии несмазанных поверхностей относительная скорость движения соприкасающихся поверхностей небольшая. Так, в случае гармонических колебаний с амплитудой 0,025 мм и частотой 50 с^{-1} максимальная скорость составляет 7,5 мм/с, а средняя — 2,5 мм/с.

Если амплитуда колебательного движения большая (около 2,5 мм), то площадь поражения фреттинг-коррозией увеличивается и изнашивание происходит как при однонаправленном скольжении. Поэтому можно считать, что амплитуда перемещения поверхностей около 2,5 мм является верхним пределом амплитуды для возбуждения фреттинг-коррозии.

Фреттинг-коррозия осуществляется также в вакууме, в среде кислорода, азота и гелия. Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии в атмосфере воздуха выше, чем в вакууме и в среде азота, а в кислороде больше, чем в гелии. Таким образом, фреттинг-коррозия представляет собой вид разрушения металлов и сплавов в мало- и неагрессивных коррозионных средах при одновременном воздействии механических и химических факторов.

Язвы и продукты коррозии на сопряженных поверхностях валов и напрессованных на них дисков, колес, муфт и колец подшипников качения, осях и ступицах колес подвижного состава железных дорог, запрессованных в картерах вкладышах подшипников, пригнанных поверхностях шпонок и их пазов, центрирующих поверхностях шлицевых соединений, опорах силоизмерительных устройств, опорных поверхностях пружин, затянутых стыках, в заклепочных соединениях между листами, на заклепках и в отверстиях, на болтах и т. п. — результат проявления фреттинг-коррозии. Данный вид коррозии наблюдается

в проволочных канатах, электровыключателях, рубильниках и штепсельных разъемах (рис. 2.22).

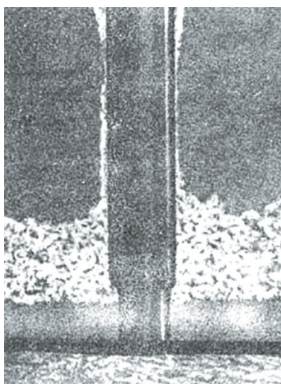


Рис. 2.22. Штепсельный разъем электрической проводки

Продукты фреттинг-коррозии накапливаются в виде порошков, содержащих металлические частицы. В случае удаления порошков из зоны трения происходит ослабление посадок с натягом.

Необходимые для протекания данного процесса относительные микросмещения сопряженных поверхностей совершаются вследствие деформации деталей под нагрузкой и вибрации их, а также колебаний, происходящих в упругих системах. Повреждения поверхностей вследствие фреттинг-коррозии служат концентраторами напряжений и снижают предел усталости.

При фреттинг-коррозии протекают следующие процессы. Под действием сил трения кристаллическая решетка поверхностных слоев при циклических тангенциальных смещениях расшатывается и разрушается. Процесс разрушения представляет собой диспергирование поверхности без удаления продуктов изнашивания. Оторвавшиеся частицы металла подвергаются быстрому окислению. Дополнительным источником повреждения поверхностей может явиться возникающее местами схватывание сопряженных металлов.

Упрощенная схема процесса фреттинг-коррозии в начальной фазе такова: перемещение и деформация поверхностей под действием переменных касательных напряжений — коррозия — разрушение окисных и других пленок — обнажение чистого металла и местами схватывание — разрушение очагов схватывания и адсорбция кислорода на обнаженных участках.

Образование окисных пленок на металлической поверхности или продуктов изнашивания в виде окислов изменяет характер протекания процесса, который начинает определяться не только физико-химическими свойствами материалов пары трения в исходном состоянии, но и природой окислов и других образовавшихся химических соединений. Окислению металла сопутствует увеличение объема. При наличии в сопряжении замкнутых контуров (например, в цилиндрических сопряжениях) это приводит к местному повышению давления, что способствует повышению интенсивности изнашивания и возникновению питтинга. Окислы оказывают абразивное действие, которое зависит от прочности сцепления окисных пленок с основным металлом, твердости окислов и размеров их частиц в продуктах изнашивания. Твердость окислов металлов, как правило, больше твердости чистых металлов.

Механизм изнашивания при фреттинг-коррозии в упрощенном виде показан на рис. 2.23.

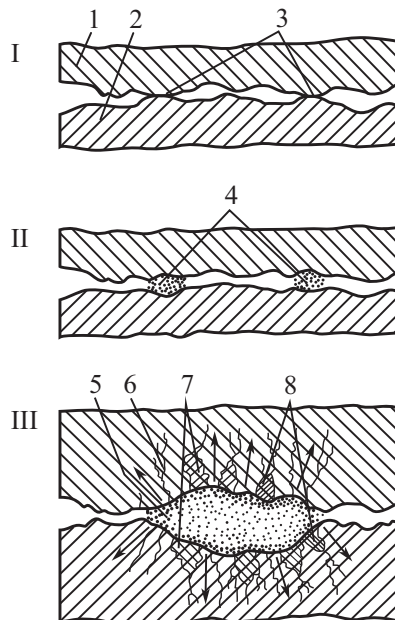


Рис. 2.23. Механизм изнашивания металлических поверхностей при фреттинг-коррозии:

1, 2 — контактирующие детали; 3 — точки контакта поверхностей; 4 — мелкие зарождающиеся каверны; 5 — общая большая каверна; 6 — трещины; 7 — отколовшиеся объемы металла; 8 — отколовшиеся частицы с твердой структурой

Первоначальное контактирование деталей происходит в отдельных точках поверхности I. При вибрации окисные пленки в зоне фактического контакта разрушаются, образуются небольшие каверны, заполненные окисными пленками II, которые постепенно увеличиваются в размерах и сливаются в одну большую каверну III. В ней повышается давление окисленных частиц металла, образуются трещины. Некоторые трещины сливаются, и происходит откалывание отдельных объемов металла. Частицы окислов производят абразивное воздействие. В результате действия повышенного давления и сил трения частиц окислов повышается температура и происходит образование белых твердых нетравящихся структур в отколовшихся частицах и на поверхности каверн.

Твердость Al_2O_3 может превосходить твердость азотированной стали, что объясняет странный на первый взгляд факт разрушения при фреттинг-коррозии твердых сплавов и сильного разрушения закаленной хромистой стали при трении о них алюминия. Напротив, хромистая сталь при трении о цинк и медь, т.е. о металлы с большей, чем у алюминия, твердостью, повреждается меньше вследствие малой твердости окислов цинка и меди. Вместе с тем медь изнашивается значительно медленнее цинка не столько в результате большей твердости, сколько вследствие того, что окисные пленки меди прочно сцепляются с основой и образуют плотный слой, защищающий основной металл. Внедрение твердых окислов олова и алюминия в мягкие металлы может значительно уменьшить их дальнейший износ. Крупный размер частиц окислов способствует повышению интенсивности изнашивания. Так, в паре алюминий – закаленная хромистая сталь, где сталь сильно изнашивается, размер частиц корунда 10 мкм.

Свободный графит в серых чугунах, контактирующих без смазочного материала, не снижает скорость изнашивания при фреттинг-коррозии. По-видимому, графит не обеспечивает эффективного смазывания в этих условиях, а структуру ослабляет. Перлитные чугуны в контакте друг с другом менее подвержены повреждению, чем ферритно-перлитные. Большая твердость является благоприятным фактором. Фосфидная эвтектика упрочняет ферритно-перлитные чугуны.

При фреттинг-коррозии возможно образование и белых слоев в результате диффузии азота или углерода из продуктов разложения масла. В результате схватывания и пластической деформации могут образовываться наплывы материала.

С увеличением давления, а в особенности амплитуды относительных смещений, скорость изнашивания при фреттинг-коррозии возрастает. Такой рост при повышении давления обусловлен увеличением площади контакта, поражаемой коррозией. Повышение частоты перемещений ускоряет изнашивание, но начиная с некоторой частоты снижается активность факторов, протекающих во времени (окислительные процессы, наклеп и др.) и рост скорости изнашивания уменьшается.

Универсальных средств борьбы с фреттинг-коррозией нет. Поскольку нельзя исключить взаимное микросмещение поверхностей вследствие упругости материала, то для борьбы с фреттинг-коррозией следует:

- уменьшить микросмещения;
- снизить силы трения;
- сосредоточить скольжение в промежуточной среде.

Уменьшить относительные микросмещения можно путем придания деталям соответствующей конфигурации или посредством повышения силы трения. Например, известно, что применение разгружающих выточек в ступицах повышает предел выносливости валов и осей.

Повышение давления может быть действенным, если проскальзывание поверхностей значительно снизится и будет скорее субмикроскопического, чем микроскопического характера; в противном случае результаты будут прямо противоположны ожидаемым. Шероховатость поверхностей может длительно влиять на коэффициент трения, если один из элементов пары не является металлом. Другой метод увеличения силы трения состоит в нанесении на поверхность электролитического слоя меди, олова, кадмия, серебра или золота. Сила трения возрастает за счет повышения фактической площади контакта сопрягаемых деталей. Например, можно исключить фреттинг-коррозию между литым алюминиевым картером и корпусом подшипника с помощью лужения. Кадмирование вкладышей, болтов и других деталей для защиты от коррозии и фреттинг-коррозии широко распространено в авиационной и автомобильной промышленности. Однако при значительных микросмещениях такие покрытия сами подвергаются фреттинг-коррозии и быстро изнашиваются.

Если исключить вибрацию невозможно, то ослабить повреждение поверхностей можно путем снижения силы трения или перенесения скольжения в промежуточную среду. Для снижения удельной силы тре-

ния достаточно понизить давление или уменьшить коэффициент трения. В условиях фреттинг-коррозии обычные смазочные материалы не влияют на коэффициент трения, т. к. граничная пленка в процессе работы не пополняется и быстро разрушается. Дисульфид молибдена в виде порошка или пасты уменьшает повреждения, но, по-видимому, он не является универсальным средством.

Аналогично действуют свинцовые белила или их смесь с MoS_2 . Фосфатированная поверхность, обработанная водной эмульсией масла или покрытая парафином, уменьшает силы трения.

Свинцовые и индиевые покрытия при малом сопротивлении сдвигу играют роль твердых смазочных материалов. Хотя сила трения при этом и уменьшается, основное назначение покрытий состоит в перенесении процесса смещений вовнутрь покрытия. Все покрытия срабатываются, большая или меньшая их эффективность определяется сроком службы.

Хорошую сопротивляемость фреттинг-коррозии оказывают пары сталь — политетрафторэтилен или полиамиды. Действенным средством могут стать резиновые прокладки.

Наконец, уменьшить повреждение от фреттинг-коррозии можно, повышая твердость одной детали. При увеличении твердости стали уменьшается взаимное внедрение деталей, что снижает интенсивность изнашивания; кроме того, продукты изнашивания в этом случае меньше размером и их абразивное действие слабее. Закалка и азотирование полезны; хромирование не предотвращает и, вероятно, не уменьшает повреждения из-за высокой твердости окисла хрома.

3. Процессы, происходящие на поверхностях трения, и механизмы изнашивания и разрушения

.....

3.1. Кинетика процессов изнашивания

Если отложить по оси абсцисс время t работы пары трения (рис. 3.1), а по оси ординат — износ U , то получим кривую изнашивания детали во времени. Тангенс угла наклона α , образованного осью абсцисс и касательной к кривой в произвольной точке, определяет скорость изнашивания в данный момент времени.

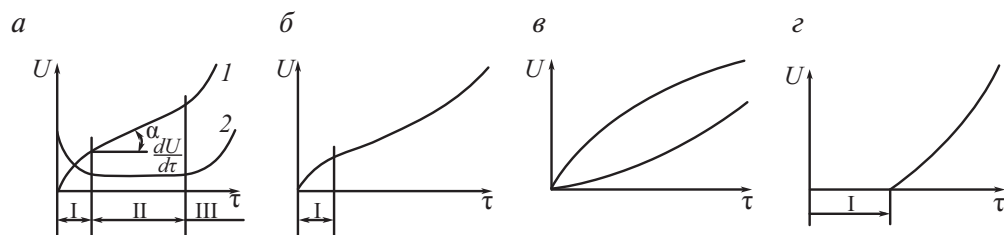


Рис. 3.1. Кинетика изнашивания при различных видах износа

Работа трущегося сопряжения обычно характеризуется тремя типичными стадиями: I — начальное изнашивание, наблюдаемое при приработке поверхностей изнашивания; II — установившееся изнашивание, наблюдаемое при нормальной эксплуатации соединения; III — катастрофическое изнашивание, характеризующееся резким возрастанием скорости изнашивания.

Приработка происходит в течение непродолжительного времени, наблюдается быстрое изнашивание выступов на поверхности контакта, выделяется теплота, происходят физико-химические изменения поверхности, уменьшается шероховатость. Детали пары трения после

сборки сопряжены по выступам неровностей поверхности, и площадь их фактического контакта в начальный период работы мала, поэтому при нагружении пары трения действуют большие давления, вызывающие значительную пластическую деформацию. Неровности поверхности частично сминаются и частично разрушаются. Срабатывание микронеровностей и сглаживание макронеровностей и волнистости поверхностей приводит к увеличению несущей способности поверхности и уменьшению интенсивности изнашивания. Одновременно «пропахивание» поверхностей взаимно внедрившимися объемами и продуктами износа в направлении относительной скорости поверхностей создает новые неровности, ориентированные вдоль направления движения и не совпадающие с направлением обработочных рисков. Создающийся к концу приработки новый микрорельеф может быть больше или меньше начальной шероховатости, причем более грубые поверхности в процессе приработки выглаживаются, а гладкие становятся более грубыми. Площадь фактического контакта при этом изменяется, коэффициент трения и температура в зоне контактов (объемная) снижаются. Микротвердость поверхностей трения к концу приработки стабилизируется независимо от их начального состояния. За время приработки происходит переформирование поверхности, изменение ее физико-механических свойств и формирование вторичной структуры. По мере того как структура и рельеф на поверхности материалов становятся оптимальными для данных условий трения, скорость их изнашивания снижается до минимальных значений.

В результате приработки трибосистема переходит в состояние, для которого характерны относительное постоянство условий трения и скорости изнашивания, максимальная несущая способность и замедленное изнашивание. Коэффициент трения при этом практически не изменяется. Процесс установившегося изнашивания состоит в деформировании, разрушении и непрерывном воссоздании на отдельных участках поверхностного слоя со стабильными свойствами, устанавливается динамическое равновесие между процессами упрочнения и разупрочнения, образования новых структур и их разрушения. В поверхностных слоях материалов сохраняются образовавшаяся в период приработки оптимальная структура и соответствующий ей рельеф. Износостойкость деталей машин в период установившегося изнашивания, а также время наступления периода катастрофического изнашивания (III, рис. 3.1) в сильной степени зависят от характера релье-

фа и структуры, образовавшихся на поверхности материалов в период приработки. Поэтому важно уметь управлять процессами формирования рельефа и структуры на поверхности деталей машин в начальный период изнашивания, т. е. в период приработки.

Период катастрофического изнашивания наступает вследствие изменения зазоров в трущихся сопряжениях, нарушения установившейся геометрии контакта или в результате изменений режима работы узла трения. При этом условия трения изменяются: растут давление, температура, ухудшаются условия смазки в зоне контакта, которые вызывают в поверхностных слоях материалов нежелательные структурные изменения. Динамическое равновесие между процессами упрочнения и разупрочнения, существовавшее в течение периода установившегося изнашивания, нарушается. Происходит снижение уровня прочности и несущей способности поверхности материалов, которое обуславливает развитие катастрофических видов изнашивания — схватывания, микрорезания.

Изнашивание деталей может существенно изменять свойства сопряжения. Увеличение зазора в сочленениях ухудшает условия жидкостной смазки и может повысить фактор динамичности, а истирание цементированного или поверхностно закаленного слоя открывает поверхности с пониженной износостойкостью. Изменения в макрогеометрии поверхностей (например, образование овалности или конусности шеек валов и цилиндров, местная выработка и волнистость направляющих, неравномерный износ зубьев по длине и т. п.) также являются причинами, ухудшающими условия трения. Эти и подобные обстоятельства могут вызвать при дальнейшей работе сопряжения увеличение интенсивности изнашивания и привести к отказу узла трения.

Катастрофическое изнашивание наступает при схватывании трущихся поверхностей, т. е. при сварке в твердом состоянии и разрушении мест сварки, сопровождающихся образованием наростов, задирами и заеданиями и значительным повреждением трущихся поверхностей. Для предотвращения схватывания применяют смазочные материалы и оксидные пленки на трущихся поверхностях. При разрушении пленок смазочных материалов или оксидов происходит схватывание.

Кривая 2 на рис. 3.1, *а* характеризует скорость изнашивания. Кривая на рис. 3.1, *б* соответствует случаю, когда после окончания приработки постепенно накапливаются факторы, ускоряющие изнашивание,

в силу чего отсутствует установившийся период. Кривые на рис. 3.1, *в* соответствуют случаям, когда отсутствует приработка и период установившегося изнашивания наступает сразу с начала работы. Кривые различаются зависимостями изменения скорости от времени. Данные закономерности изнашивания характерны для условий абразивного износа, при работе инструмента и рабочих органов машин. Им, например, «подчиняется» износ резца по задней грани или лезвия лемеха плуга по ширине задней фаски. Подобным образом могут изнашиваться и некоторые элементы машин, например, цепные передачи сельскохозяйственных машин. Кривая изнашивания на рис. 3.1, *г* относится к деталям, находящимся под действием контактных напряжений, причем эти детали работают длительное время практически без истирания. Начавшееся усталостное выкрашивание поверхностных слоев усиливается действием продуктов разрушения.

3.2. Структурные превращения металлов при трении

Изменения на поверхностях трения возникают в результате деформации, повышения температуры и химического действия окружающей среды.

Поверхность металлических изделий в сравнении с их внутренними частями имеет ряд особенностей. Любой атом, расположенный внутри металла с идеальной кристаллической решеткой, находится в состоянии подвижного устойчивого равновесия, поскольку для него по всем направлениям интенсивность силового поля взаимодействия одинакова (см. рис. 1.1). В ином положении оказываются атомы, которые находятся на поверхности: они имеют только односторонние связи с металлом, поэтому их состояние неуравновешенное, неустойчивое; они более активны, обладают избыточной или свободной энергией в сравнении с атомами, находящимися внутри, что приводит к высокой сорбционной активности поверхностного слоя. В реальных условиях поверхность металлов всегда покрыта адсорбированным слоем механических частиц (пыли) и атомов элементов окружающей среды, покрываясь слоями газов, паров воды, окислов, состав которых зависит от конкретной среды. На рис. 3.2 представлена схема строения поперечного сечения поверхности металла на воздухе. Кроме представлен-

ных на схеме составляющих поверхностных пленок, на металле могут находиться также различные случайные загрязнения: частицы абразивов, силикатов и др. Состав оксидных пленок и их толщина зависят от природы металлов, состава окружающей газовой среды и условий их взаимодействия (температуры, давления, продолжительности). Оксидные пленки на металле образуются в результате процесса физической адсорбции — захватывания поверхностными атомами металла молекул окружающего газа, в первую очередь кислорода, и последующей химической адсорбции — взаимодействия атомов газа и металла с образованием прочных связей.

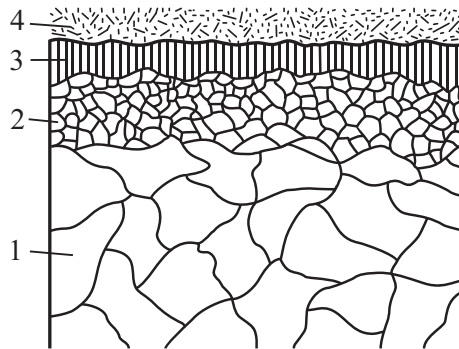


Рис. 3.2. Схематическое изображение строения поперечного сечения поверхности металла на воздухе:

- 1 — металл глубинных слоев; 2 — внешний кристаллический слой с частицами оксидов;
3 — оксидный слой; 4 — адсорбированный слой (вода, воздух, масла, пыль)

Практически все металлы подвергаются окислению. Образование оксидных пленок на большинстве металлов происходит с высокой скоростью уже при комнатной температуре. Так, для возникновения слоя толщиной 1,4 нм достаточно 0,05 с, при этом сравнительно быстро достигается некоторая максимальная их толщина, например 2–4 нм для алюминия, 5–10 нм для железа, 10–20 нм для меди. С увеличением толщины рост пленки замедляется. Образование толстых пленок (окалины) происходит при высоких температурах. Если металл образует несколько оксидов, то формируется многослойная окалина, например железо с кислородом образует три окисла, представляющие собой фазы в системе O_2-Fe с разным типом кристаллической решетки: FeO (вюстит), Fe_3O_4 (магнетит), Fe_2O_3 .

Вюстит растворим в железе и устойчив при температуре выше 570 °С; ниже этой температуры он распадается на магнетит и чистое железо:



Магнетит и гематит устойчивы во всем диапазоне температур до точек плавления. Пленка на железе состоит из слоев, расположенных от поверхности внутрь в последовательности, соответствующей убыванию кислорода в окисле. При температуре ниже 570 °С пленка может состоять из одного слоя Fe_3O_4 , из наружного слоя Fe_2O_3 и следующего за ним слоя Fe_3O_4 или из слоев Fe_2O_3 , Fe_3O_4 и FeO , причем распад FeO идет вслед за его образованием.

Свойства оксидных пленок оказывают существенное влияние на адгезионное поведение металлов. Несмотря на малую толщину, пленка всего в несколько элементарных ячеек кристаллической решетки данной фазы окисла при комнатной температуре приостанавливает дальнейшее окисление. Разрушение поверхностей трения в среде воздуха тоже сопровождается их окислением.

Оксидная пленка находится в напряженном состоянии, испытывая растяжение или сжатие в зависимости от соотношения объемов основного металла и образовавшегося на его базе окисла. С увеличением толщины пленки возрастают силы упругости в самой пленке и на границе между пленкой и основным металлом. При некоторой толщине пленки происходит потеря ее устойчивости, наступают мгновенные смещения и пленка приобретает рыхлое строение.

При эксплуатации детали машин контактируют друг с другом или с окружающей средой. При этом поверхностный слой детали подвергается наиболее сильному физико-химическому воздействию: механическому, тепловому, магнитоэлектрическому, световому, химическому и др. В большинстве случаев у детали начинают ухудшаться служебные свойства поверхности, например разрушения в результате адгезионного усталостного и абразивного изнашивания, эрозии, кавитации, коррозии и других дефектов, развивающихся вначале на поверхности. Поэтому от качества и структуры поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства — сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости и др.

Физико-механические свойства поверхностного слоя формируются при изготовлении деталей, а затем изменяются во время эксплуатации под действием силовых, температурных и других факторов.

Среди последних можно отметить *эффекты Ребиндера* (внешний и внутренний), заключающиеся в адсорбционном понижении прочности материалов за счет понижения свободной энергии и расклинивающего действия поверхностно-активных веществ (ПАВ) при их попадании в полость поверхностных трещин. Известно, что покрытия и пленки, образовавшиеся на поверхности, могут проявлять экранирующий эффект для подвижных дислокаций, при котором затрудняется их выход наружу; в результате повышаются пределы прочности и ползучести, а также усталостная долговечность подповерхностного слоя.

Если металлическое изделие в процессе работы соприкасается своей поверхностью с газовой или жидкой фазами в результате воздействия окружающей среды, то может происходить существенное изменение механических свойств (прочности, пластичности, износостойкости и т. д.) металлических материалов. Такие эффекты, вызванные влиянием среды, широко распространены и проявляются в разнообразной форме. В их основе лежат различные физико-химические процессы, протекающие на поверхности материала и в его объеме. В зависимости от того какой процесс оказывается ведущим, принято выделять две группы эффектов, наблюдаемых при взаимодействии металла с окружающей средой.

К первой группе относятся эффекты, вызванные протеканием необратимых процессов. К ним причисляют разные формы коррозии, связанные с развитием химических и электрохимических реакций. Коррозия часто не изменяет механических свойств металла, а приводит к постепенному и равномерному уменьшению размеров нагруженной детали. Например, подобная картина наблюдается при растворении металла вследствие электрохимической коррозии. В результате напряжения, действующие в опасном сечении, растут (из-за уменьшения сечения). Когда они превысят допустимый предел, произойдет преждевременное разрушение изделия. В ряде случаев неблагоприятное влияние коррозионного воздействия среды сводится главным образом к образованию на поверхности локальных очагов поражения (питтингов, трещин), играющих роль концентраторов напряжений.

Эффекты второй группы вызываются в основном обратимыми физико-химическими процессами, приводящими к понижению свободной поверхностной энергии металла. Такие эффекты, как правило, способствуют заметному изменению самих механических свойств материала. Понижение прочности, облегчение деформации и разру-

шение металлов вследствие обратимого физико-химического воздействия среды называется эффектом Ребиндера. Это явление названо по имени академика П. А. Ребиндера, который в 1928 г. открыл и впервые изучил его. Эффект Ребиндера может проявляться на любых твердых телах, в том числе и на металлах.

Свободную поверхностную энергию твердых тел можно понизить различными способами. Однако наиболее существенно это удастся сделать путем:

- контакта с жидкой средой, близкой к данному материалу по своей молекулярной природе;
- адсорбции так называемых поверхностно-активных веществ (ПАВ) из окружающей среды или из объема самого материала.

Поверхностно-активные вещества — это химические соединения, которые, концентрируясь на поверхности раздела термодинамических фаз, вызывают снижение поверхностного натяжения.

Если происходит изменение механических свойств, вызванное понижением свободной поверхностной энергии вследствие адсорбции, то этот эффект называется адсорбционным понижением прочности.

Интересным эффектом, отмеченным при изучении взаимодействия поверхностей материалов друг с другом и со средой, являются аномальные химические процессы. К таким процессам можно отнести избирательный перенос и динамическую диффузию. Эффект избирательного переноса (безызносности), открытый Д. Н. Гаркуновым, И. В. Крагельским и А. А. Поляковым, появляется в результате анодного растворения материалов пары трения, при этом на рабочих поверхностях образуются тонкие пленки из пластичных элементов растворенного материала.

Динамическая дислокационная диффузия состоит в переносе атомов по ядрам движущихся дислокаций. Согласно исследованиям, перемещение поверхностных атомов при этом может достигать глубины 5–7 мкм, что объясняется возбуждением атомов ядра при движении дислокаций.

Изменения, вызванные деформацией при трении

Взаимное контактирование деталей происходит на вершинах волн и выступах поверхностей, образованных макронеровностями (см. рис. 1.3).

Процесс контактирования поверхностей при статическом нагружении протекает следующим образом. Поверхность воспринимает нагрузку вершинами выступов неровностей на высотах, образуемых в результате макрогеометрических отклонений. Здесь располагаются зоны, из которых складывается фактическая площадь касания. В контакт первыми вступают противостоящие друг другу на сопряженных поверхностях выступы, сумма высот которых наибольшая. Деформация неровностей вызывает сближение поверхностей. По мере увеличения нагрузки поверхности все более сближаются и в контакт вступают выступы с меньшей суммой высот. Разновременность вхождения в контакт выступов, различающихся по высоте, дифференцирует их напряженное состояние и деформацию.

Возможны следующие деформации выступов: упругая и упругопластическая с различной степенью упрочнения. При первичном нагружении чисто упругая деформация неровностей возможна только у эластичных тел, например резины; упругая деформация превалирует при контактировании весьма гладких твердых металлических поверхностей. В большинстве случаев первичного нагружения пластической деформации принадлежит ведущая роль в формировании фактической площади контакта. Входящие в касание выступы пластически сплющиваются, чаще всего с внедрением: внедряется более твердый выступ или тот, которому геометрическая форма придает большее сопротивление деформации.

Пластическая деформация выступов микронеровностей и их взаимное внедрение начинаются при среднем давлении на контакте, равном примерно утроенному пределу текучести материала. Предельное среднее давление на площадях фактического контакта с учетом упрочнения материала в процессах пластической деформации достигает двух-трехкратного значения его твердости при вдавливании. При этом давлении материал под контурной площадкой, деформировавшийся упруго, начинает деформироваться пластически, в результате либо увеличиваются размеры площадки за счет частичного погружения находящихся в контакте выступов и поднятия других с вступлением их в контакт, либо возникают новые площади контакта. Полное погружение выступов в пластически деформированную основу не наблюдается. После даже сильной деформации шероховатость поверхностей лишь несколько видоизменяется.

Площадь фактического контакта поверхностей состоит из множества дискретных малых площадок, расположенных на различных вы-

сотах пятен касания в местах наиболее полного сближения поверхностей. Между площадками касания тел имеются соединенные между собой или закрытые микрополости, заполненные воздухом или другой газовой средой, смазочным материалом, продуктами изнашивания и т. п. Площадь фактического контакта зависит от микро- и макрогеометрии поверхностей, волнистости, физико-механических свойств поверхностного слоя и нагрузки. При небольшой нагрузке рост площади фактического контакта сопровождается увеличением размеров площади контакта.

Площадь фактического контакта составляет от одной десятитысячной до одной десятой номинальной площади касания. Даже при высоких нагрузках площадь фактического контакта не превышает 40 % номинальной площади. Так, в случае контактирования стали по стали при нагрузке 15 МПа отношение площадей составило 0,2 при обработке поверхности до $R_a = 2,5 \dots 1,25$ мкм и 0,35 при $R_a = 0,63 \dots 0,32$ мкм.

Площадь фактического контакта возрастает при увеличении нагрузки, уменьшении шероховатости поверхности и радиуса закругления вершин ее неровностей; кроме того, она несколько увеличивается при большей длительности действия нагрузки. Такая площадь убывает с увеличением упругих характеристик, предела текучести материала и высоты неровностей поверхностей.

При сопряжении поверхностей из двух различных материалов площадь фактического контакта определяется физико-механическими свойствами более мягкого материала и геометрией поверхности более твердого материала.

Контактирование поверхностей реальных поликристаллических твердых металлов и сплавов приводит к образованию шероховатой поверхности вследствие неоднородности деформации, т. к. они имеют разную ориентировку кристаллических зерен, выходящих на поверхность, а большинство сплавов дополнительно еще обладают неоднородностью различных структурных составляющих по твердости и строению фаз. В результате на отдельных площадках фактического контакта, начиная с малых нагрузок, происходит взаимное внедрение твердых составляющих и кристаллов, обращенных к поверхности «сильными» гранями, в менее твердые структурные составляющие и «слабые» грани кристаллов, например частиц карбидов в ферритную основу.

На рис. 3.3 показано сечение сжатых пластин с первоначально гладкими сопряженными поверхностями; стальную поверхность об-

рабатывали шлифовальной шкуркой, а поверхность баббита полировали. Как видно на рисунке, баббит заполнил впадины между выступами стальной поверхности; его микрогеометрия также претерпела значительные изменения.

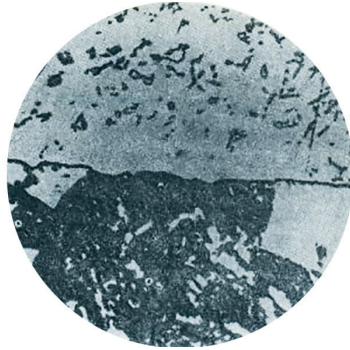


Рис. 3.3. Участок сечения поверхности соприкосновения стали (вверху) и баббита при сжатии (х30) под давлением 3 МПа

Неоднородность металла, вызванная всевозможными включениями, сегрегацией примесей, трещинами, остаточными напряжениями и т. п., благоприятствует взаимному внедрению поверхностей. Так, в серых чугунах полости, заполненные графитом, являются преимущественно областями взаимного внедрения. Для изнашивания поверхностей трения имеет значение не сам факт изменения их шероховатости, обусловленный неоднородностями строения металлов, а связанное с ним взаимное внедрение поверхностей. Глубина взаимного внедрения зависит от физико-механических свойств материалов, шероховатости поверхностей и нагрузки. Если исключить взаимное внедрение выступов поверхностей, упрочненных в результате обработки, то при малых нагрузках взаимное внедрение незначительно по глубине и имеет в основном упругий характер. Возможно также взаимное внедрение поверхностей при контактировании металла с неметаллом и неметаллов, т. е. неоднородность строения свойственна всем материалам, в том числе и аморфным.

Изменения, вызванные деформацией, заключаются в следующем:

1. Многократные упругие деформации из-за несовершенства структуры материала приводят в определенных условиях к усталостному выкрашиванию поверхностей качения, а многократные упругие деформации микронеровностей поверхностей скольжения вызывают

образование и скопление вакансий и дислокаций, постепенно формирующих зародыши микротрещин.

2. Пластическое деформирование изменяет структуру поверхностного слоя металлических материалов посредством действия четырех наиболее важных элементарных процессов: скольжения по кристаллографическим плоскостям (скольжение в отдельных зернах поликристаллического тела происходит обычно по нескольким плоскостям, число которых возрастает с повышением напряжения); двойникования кристаллов; отклонения атомов от правильного расположения в решетке и их теплового движения; разрушения структуры. Разрушение структуры — это заключительный этап пластической деформации по мере накопления дефектов кристаллического строения (пограничных и внутризеренных дислокаций и вакансий, двойников деформации и дефектов упаковки при возрастании уровня или многократном повторении циклов напряжения. В результате происходит ослабление, разрыхление, а в дальнейшем и формирование микропор и микротрещин.

3. Пластическая деформация при температуре ниже температуры рекристаллизации приводит к наклепу поверхностного слоя — его упрочнению. Однако у самой поверхности структура несколько ослаблена из-за появления микропор, микротвердость понижается, достигая максимума на некоторой глубине, далее уменьшаясь до исходной.

4. При сильно отличающихся по твердости структурных составляющих материала и многократном воздействии нагрузки происходит вначале интенсивное изнашивание мягкой основы, вследствие чего повышается давление на выступающие твердые составляющие, они вдавливаются в мягкую основу, некоторые из них дробятся и перемещаются дополнительно под действием сил трения. В результате такого избирательного изнашивания поверхность обогащается твердыми структурными составляющими и приобретает строчечную структуру, что было обнаружено М. М. Хрущовым и А. Д. Курицыной при износе баббита.

Влияние повышения температуры состоит в следующем:

1. Если по условиям службы пары трения температура поверхностных слоев выше температуры рекристаллизации металла, то поверхностный слой не наклепывается, а пребывает в состоянии повышенной пластичности, размягчения — происходит выглаживание поверхности за счет растекания всего металла или только одной структурной составляющей сплава.

2. Высокая температура и пластическая деформация способствуют диффузионным процессам; в итоге возможно обогащение поверхности некоторыми элементами (например, поверхности стали углеродом), коагуляция отдельных структурных составляющих, взаимное диффузионное растворение материалов деталей пар трения.

3. При интенсивном локальном повышении температуры (температурной вспышке) и последующем резком охлаждении поверхности нижележащей холодной массой металла на поверхности могут образоваться закалочные структуры. Этому способствует высокое давление (от нагрузки), снижающее температуру фазовых превращений.

4. Возможные высокие температурные градиенты и структурные превращения — каждое в отдельности или совместно — вызывают напряжения в материале, которые могут влиять на его пластическую деформацию и разрыхление.

5. При микроскопическом исследовании контакта деталей в условиях высоких нагрузок и температур установлена возможность образования магмы-плазмы (рис. 3.4). Взаимодействие микроконтактов происходит за очень короткое время (10^{-8} – 10^{-7} с), в течение которого к контакту подводится большая энергия. Для таких условий законы классической термодинамики не выполняются. Материал тонкого поверхностного слоя преобразуется, в результате чего в зоне соударения неровностей образуется магма-плазма; процесс сопровождается эмиссией электронов.

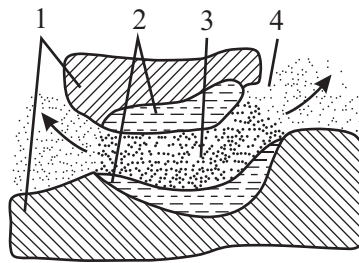


Рис. 3.4. Модель магмы-плазмы:

1 — исходная структура; 2 — расплавленная структура; 3 — плазма; 4 — электроны, движущиеся при трибоэмиссии (по Д. Н. Гаркунову)

Деформация металла в зоне контакта сопровождается выделением тепла, вследствие чего поверхностные слои нагреваются. Температура нагрева определяется интенсивностью выделения тепла и скоростью

отвода его из зоны трения. Интенсивность тепловыделения в отдельном пятне касания определяется соотношением

$$g = fNv/(AJ),$$

где f — коэффициент трения; N — нормальная нагрузка; v — скорость скольжения; A — площадь пятна; J — механический эквивалент тепла.

При трении различают:

- температуру на единичном пятне контакта (температуру вспышки);
- среднюю температуру поверхности;
- среднюю объемную температуру;
- предельную суммарную температуру на поверхности трения.

На пятнах фактического контакта, размеры которых порядка 1–10 мкм, возникают температурные вспышки (импульсы) длительностью 10^{-4} – 10^{-8} с. Температура вспышки может достигать температуры плавления контактирующих металлов. Температура вспышки оказывает большое влияние на возникновение и развитие трибохимических реакций между поверхностью металла и окружающей средой. Расчет и экспериментальное измерение температуры вспышки весьма сложны.

Средняя температура поверхности характеризует температурные условия в объемах и на участках поверхности, соизмеримых по величине с размером зерен (порядка 10–100 мкм). В случае контакта одинаковых материалов при круговой форме площадки касания средняя температура поверхности может быть определена по формуле

$$t_{\text{cp}} = \frac{9fNv}{64J\lambda a},$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала; a — радиус площадки касания.

Объемная температура характеризует температурные условия в объемах поверхностного слоя материала размером 0,1–1,0 мм и более. Объемную температуру определяют экспериментально с помощью микротермопар.

Предельная температура на поверхности трения t_{Σ} определяется как сумма температуры вспышки $t_{\text{вс}}$ и средней температуры поверхности t_{cp} :

$$t_{\Sigma} = t_{\text{вс}} + t_{\text{cp}}.$$

Большое количество дефектов кристаллического строения в поверхностных слоях трущихся тел, а также повышенные температуры обуславливают интенсивное развитие диффузионных процессов, приводящих к изменению структуры, химического и фазового состава материалов. Физико-химическое взаимодействие поверхности металла с окружающей средой приводит к образованию пленок так называемых вторичных структур. Вторичные структуры, например оксиды, обладая высокой прочностью, теплостойкостью, пониженной теплопроводностью, хорошо защищают поверхность основного материала от разрушения (см. рис. 3.2) и способствуют развитию нормального изнашивания.

Химическое действие среды заключается в следующем:

1. В среде воздуха на обнаженных при изнашивании чистых металлических поверхностях образуются оксидные пленки в результате действия кислорода газовой фазы или кислорода, содержащегося в масле и его перекисях. Оксидные пленки предохраняют поверхности от схватывания и связанного с ним глубинного вырывания и являются важным фактором не только при трении без смазочного материала и граничной смазке, но и при полужидкостной смазке. Опыты в вакууме, в среде азота, аргона и гелия при трении без смазочного материала и при граничной смазке, когда образование оксидных пленок исключалось (могло быть только за счет кислорода в масле), показали весьма высокую интенсивность изнашивания поверхностей трения.

2. Металлические поверхности, взаимодействуя с химически активными присадками в масле, покрываются пленками химических соединений, роль которых аналогична роли оксидных пленок. Пленки эффективно защищают поверхность от изнашивания, если скорость их образования превышает скорость изнашивания.

3. Возможно насыщение поверхности углеродом в результате разложения смазочного материала при высокой температуре.

4. Агрессивные жидкости и газовые среды активизируют изнашивание.

Если пленки вторичных структур обладают повышенной хрупкостью, они тем самым интенсифицируют изнашивание. Установлено, например, что насыщение поверхности трения титановых сплавов, сталей и других металлических материалов водородом при трении в водородсодержащих средах (вода, авиационное топливо, некоторые типы смазок, глицерин и др.), а также в паре с деревом, пластмассами

вызывает резкое охрупчивание поверхностного слоя. Интенсивное выкрашивание хрупкого наводороженного слоя металла способствует развитию особого вида ускоренного изнашивания поверхности трения, получившего название водородного износа (см. подглаву 2.7).

Диффузионные процессы в микрообъемах металла, примыкающих непосредственно к поверхности трения или к пленкам вторичных структур, могут приводить к значительным структурным изменениям в этих микрообъемах. Фрикционный нагрев способствует протеканию в поверхностном слое процессов отпуска, возврата и рекристаллизации, что приводит к разупрочнению поверхности, снижению ее несущей способности, усилению схватывания. В тяжелых условиях трения (высокие скорости и давления, отсутствие смазки), когда имеет место интенсивный фрикционный нагрев, в поверхностном слое стали может происходить $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение. Возникает так называемый аустенит трения. Любарский И. М. и другие обнаружили на поверхности трения стали 20Х2Н4А аустенитный слой толщиной в несколько микрометров. После прекращения трения в процессе охлаждения этот аустенит полностью или частично распадался. Аустенит трения в ряде случаев обладает повышенной устойчивостью и может сохраняться в структуре после охлаждения до комнатной и более низких температур, что объясняется высоким уровнем его легированности, а также стабилизирующим влиянием деформационного и фазового наклепа. Поверхностный слой обогащается легирующими элементами в результате их диффузии из глубинных слоев металла (термодиффузия, восходящая диффузия), а также из окружающей среды. Так, при термическом разложении смазки в зоне контакта поверхность металла может насыщаться углеродом и другими элементами, содержащимися в смазке. Аустенит трения, обладая повышенной прочностью, теплостойкостью, может увеличивать сопротивление стали изнашиванию. Образование аустенита при трении и его ускоренное охлаждение (вторичная закалка) приводят к формированию нетравящихся («белых») слоев на поверхности стальных деталей. Белые слои обладают высокой микротвердостью $HV = 9...15$ ГПа и значительной хрупкостью. Установлено, что белые слои характеризуются высокой дисперсностью структуры, химической неоднородностью и сложным фазовым составом. В них присутствуют аустенит (20–80 %), так называемый скрытноигольчатый (или мелкокристаллический) мартенсит и карбиды. В услови-

ях динамического нагружения белые слои из-за высокой хрупкости интенсивно выкрашиваются, что и ведет к ускоренному повреждению поверхности.

3.3. Виды нарушения фрикционных связей поверхностей трения

При совместном действии однократной или многократной упругопластической деформации и адгезионного взаимодействия происходит разрушение рабочей поверхности контактирующих тел, обнаруживаемое визуально или под микроскопом. Разрушение развивается в виде отдельных элементарных процессов, сочетание которых зависит от природы взаимодействующих материалов и условий трения.

И. В. Крагельский и другие показали, что в зависимости от прочности молекулярных связей по отношению к пределу текучести материала τ_1/σ_T и величины относительного внедрения неровностей сжатых поверхностей h/R (R — радиус неровности, h — глубина ее внедрения в поверхность контртела) возможны пять основных видов нарушения фрикционных связей (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Виды нарушения фрикционных связей
(виды разрушения поверхности трения):

- 1 — упругое оттеснение; 2 — пластическое оттеснение металла; 3 — микрорезание;
4 — схватывание пленок на поверхности материалов и их разрушение; 5 — схватывание металлических поверхностей

Упругое оттеснение. Данный вид напряженного состояния в зоне контакта возникает при трении высокопрочных материалов, а также в период установившегося изнашивания. Разрушение имеет усталостный характер (фрикционная усталость). Число циклов до разрушения велико ($n \rightarrow \infty$). Для сталей $h/R < 0,01$; для цветных металлов $h/R < 0,0001$.

Пластическое оттеснение металла. Характеризуется остаточной деформацией поверхности после прохода микровыступа; сухое трение

$h/R < 0,1$; граничное трение $h/R < 0,3$. При данном виде напряженного состояния возникает малоцикловая фрикционная усталость в поверхностных слоях металла. Наиболее часто это наблюдается в период приработки; возможно также в период установившегося (эксплуатационного) изнашивания при трении пластичных материалов ($n < 10^5$).

Микрорезание. Характеризуется образованием микростружки; сухое трение $h/R > 0,1$; граничное трение $h/R > 0,3$. Разрушение материала происходит за один цикл ($n = 1$). Это аварийный вид разрушения поверхности, наиболее часто наблюдающийся при воздействии закрепленного абразива на поверхность металла.

Схватывание пленок на поверхности материалов и их разрушение. Происходит при трении с твердыми смазками, а также в случае образования на поверхности металлов прочных оксидных пленок. Это благоприятный вид разрушения фрикционных связей, т. к. процесс разрушения локализуется внутри поверхностной пленки; разрушение же основного материала происходит за очень большое число циклов ($n \rightarrow \infty$). Условие возникновения данного вида нарушения фрикционных связей — положительный градиент свойств прочности в поверхностном слое материала $d\tau/dh > 0$, где τ — сопротивление сдвигу; h — расстояние от поверхности.

Схватывание металлических поверхностей. Наблюдается при отрицательном градиенте свойств прочности в поверхностном слое материала $d\tau/dh < 0$. Аварийный вид изнашивания; разрушение материала происходит за один проход микровыступа ($n = 1$).

Под схватыванием металлов обычно понимают явление образования адгезионных металлических связей между микроучастками поверхностей контактирующих тел при сближении их на расстояния порядка межатомных (см. подглаву 2.5). Установлено, что пластическая деформация металла в зоне контакта — необходимое условие возникновения и развития узлов (мостиков) схватывания. Пластическая деформация разрушает поверхностные пленки, экранирующие металлические поверхности, а также способствует формированию и развитию контакта между вновь образовавшимися чистыми («ювенильными») поверхностями. Имеются, кроме того, данные, свидетельствующие о том, что пластическая деформация приводит поверхностные слои металла в активизированное состояние, характеризующееся высокой плотностью дефектов кристаллического строения, текстурой, пониженной работой выхода электрона и др. Такая активизация поверх-

ности контактирующих тел способствует развитию процесса схватывания. Большое влияние на развитие схватывания оказывают тип кристаллической решетки, наличие или отсутствие взаимной растворимости, характер легирования, а также деформационные характеристики контактирующих металлических материалов.

3.4. Механизмы изнашивания и разрушения при трении

Первоначально считалось, что процесс изнашивания заключается в зацеплении неровностей поверхности, которое при скольжении поверхностей приводит к срезанию или выкрашиванию неровностей. В результате вырывов образуются новые неровности, и процесс далее так и продолжается.

Процесс изнашивания расчленяется на три явления:

- взаимодействие поверхностей трения;
- изменения, происходящие в поверхностном слое металла;
- разрушение поверхностей.

Данные явления не рассматриваются как последовательные этапы, они непрерывно переплетаются и взаимно влияют друг на друга.

Взаимодействие поверхностей может быть механическим и молекулярным (см. подглаву 1.1). Механическое взаимодействие выражается во взаимном внедрении и зацеплении неровностей поверхностей в совокупности с их соударением в случае скольжения грубых поверхностей. Молекулярное взаимодействие проявляется в виде адгезии и схватывания. Именно действие адгезии вызывает необходимость приложения касательной силы для относительного сдвига поверхностей и может привести к вырывам материала. Схватывание свойственно только металлическим поверхностям и отличается большей прочностью связи, чем адгезия. Оно обязательно произойдет при разрушении масляной пленки.

Под действием однократной или многократной упругопластической деформации происходит разрушение рабочей поверхности контактирующих тел, обнаруживаемое визуально или под микроскопом. Разрушение развивается в виде отдельных элементарных процессов, сочетание которых зависит от природы взаимодействующих материалов и условий трения. Различают следующие элементарные виды разрушения:

1. *Царапание*. Образовавшаяся или появившаяся на поверхности трения частица (или выступ сопряженного тела) перемещается в направлении скольжения и подминает материал, оставляя царапину. Последняя обрывается при выходе внедрившегося элемента из зоны фактического контакта, при раздроблении частицы, ее впрессовывании или уносе за пределы области трения. Повторное царапание по одному месту с одинаковой интенсивностью в парах трения бывает редко, чаще зона последующей пластической деформации перекрывает ранее образовавшуюся царапину, покрывается царапинами, почти параллельными направлению скольжения, а между царапинами располагается материал, претерпевший многократную пластическую деформацию и соответственно наклепанный, т. е. исчерпавший способность пластически деформироваться. При последующем нагружении внутри такого участка легко образуются трещины, развитие которых приводит к отделению материала от основы. Очевидно, не только скользящие, но и перекатывающиеся частицы могут оставить на поверхности царапины. Внедрившаяся частица, упираясь при своем движении в твердую составляющую материала, может отклониться в сторону, и поэтому направление царапины на поверхности не следует строго направлению перемещения детали.

2. *Микрорезание*. При внедрении на достаточную глубину твердая частица абразива или продукта изнашивания может произвести микрорезание материала с образованием стружки. Микрорезание в парах трения проявляется редко, т. к. глубина внедрения недостаточна при действующих нагрузках, однако в условиях контакта с незакрепленными абразивными частицами, при дроблении твердых тел или скольжении по абразивной массе этот вид изнашивания может стать преобладающим.

3. *Отслаивание*. Материал при пластическом течении может оттесняться в сторону от поверхности трения и после исчерпания способности к дальнейшей пластической деформации отслаивается. В процессе течения материал наплывает на окисные пленки и теряет связь с основой. Если при линейном и точечном контакте тел напряжение на некоторой глубине от поверхности стало больше предела усталости материала, то при работе образуются трещины, приводящие к чешуйчатому отделению материала. Такой вид разрушения встречается на закаленных или цементированных деталях, например зубчатых колесах. Дефекты металла в виде шлаковых включений, свободного це-

ментита, значительные остаточные напряжения растяжения способствуют отслаиванию.

4. *Выкрашивание (питтинг)* — образование ямок на поверхности трения в результате отделения материала при усталостном изнашивании. Распространенный вид повреждения рабочих поверхностей деталей в условиях трения качения и скольжения. Для выкрашивания характерна произвольная форма ямок с рваными краями. Могут выкрашиваться твердые или мягкие включения или фазы, окаймленные структурными составляющими с отличающейся твердостью, при контактно-усталостном воздействии. Могут выкрашиваться: твердые структурные составляющие сплава после того, как износится его мягкая основа; частицы белого слоя; островки основной массы серого чугуна, окаймленные графитовыми включениями; частицы антифрикционного металлического слоя при усталостных повреждениях; твердые оксидные пленки (на железоуглеродистых и алюминиевых сплавах); частицы металлизационного покрытия и др. Выкрашиванию способствуют высокие остаточные напряжения растяжения в поверхностном слое после обработки, трещины после цементации, закалки или старения, а также значительные термические напряжения, возникающие при трении или вследствие неудовлетворительного смазывания.

Непосредственно выкрашиванию предшествует образование и развитие трещин, ограничивающих единичные малые объемы от остального материала. Таким образом, трещинообразование является составной частью процесса выкрашивания, а также отслаивания. Трещинообразование из-за термических напряжений может охватить значительную площадь и на определенной стадии развития трещин может даже служить признаком брака, поэтому оно должно рассматриваться как особый вид повреждения поверхностей трения.

5. *Схватывание материалов* проявляется в субмикроскопических повреждениях, постепенно переходящих к локализованному разрушению поверхностного слоя и к глубинному вырыванию. Может наблюдаться процесс схватывания отдельных составляющих сплава, остальные составляющие уносятся в смазочный материал или уходят из зоны трения.

6. *Задир* — образование в результате схватывания различных невооруженным глазом борозд (или группы борозд) с оттеснением материала как в стороны, так и по направлению движения.

7. *Глубинное вырывание* — местное повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких полос в направлении скольжения, возникающее в результате схватывания двух контактирующих тел вследствие действия молекулярных сил. Возникает при относительном движении тел, когда образовавшийся вследствие их молекулярного взаимодействия спай прочнее одного или обоих материалов. Разрушение происходит в глубине одного из тел. Поверхности разрушения у пластичных материалов представляют собой выступающие вытянутые по направлению движения гребни и сужающиеся вглубь материала конусы. Прилегающие к местам вырывов участки пластически деформируются в большей или меньшей степени. Вырванный материал остается на сопряженной поверхности. Это одна из причин переноса материала при трении.

8. *Перенос материала* — явление при трении, состоящее в том, что материал одного тела соединяется вследствие действия молекулярных сил с другим и, отрываясь от первого, остается на поверхности второго. Перенос материала характерен для большинства видов трения, кроме трения при жидкостной смазке, и обнаруживается при таких технологических операциях, как резание, клепка и сборка болтовых соединений: металл переносится с пневматического молотка на заклепки, с ключа на гайки, с резца на металл. Перенос материала происходит отдельными частицами, средний размер которых имеет вполне определенную величину для данных условий трения. По сравнению с трением без смазочного материала трение при граничной смазке может снизить перенос в 90 000 раз и более, главным образом за счет уменьшения среднего размера частиц. Перенос материала на металлическую поверхность может играть роль стимулятора коррозии металлической поверхности. Перенос материала не характеризует интенсивность изнашивания поверхностей трения. Перенесенная частица может многократно переходить с одной поверхности трения на другую и обратно. Износ будет в том случае, если перенесенная частица уйдет из зоны трения. Это связано с процессами прямого и обратного переносов и зависит от конечного механизма отрыва перенесенной частицы, в частности от ее окисления или же от возникновения неблагоприятных напряжений на границе раздела между частицей и подложкой. Перенос металла является одним из необходимых условий обеспечения избирательного переноса (см. подглаву 3.5).

9. *Заедание* — наиболее яркая форма проявления схватывания, при котором образуются широкие и глубокие борозды с неровными краями, иногда слившиеся; присутствуют крупные наросты, возможно оплавление поверхностей, полное заклинивание.

3.5. Эффект безызносности (избирательный перенос при трении)

3.5.1. Сущность эффекта безызносности

В середине 1950-х гг. при исследовании технического состояния узлов трения самолета Ил на разных этапах его эксплуатации Д. Н. Гаркунов обнаружил явление самопроизвольного образования тонкой пленки меди на поверхностях деталей тяжело нагруженных узлов в паре трения сталь—бронза при смазывании спиртоглицериновой смесью. Пленка меди толщиной 1–2 мкм в процессе трения покрывала как бронзу, так и сталь. Она резко снижала интенсивность изнашивания пары трения и уменьшала силу трения примерно в 10 раз. Почти в то же время подобное явление было обнаружено в парах трения сталь—бронза при использовании смазки ЦИАТИМ-201 (в шарнирно-болтовых соединениях самолетов), а также в паре сталь—сталь в узлах трения компрессора домашнего холодильника при смазывании масел фреоновой смесью.

Исследования показали, что медная пленка в паре бронза—сталь образуется в результате анодного растворения бронзы (легирующие элементы цинк, олово, алюминий, железо уходят в смазочный материал, и поверхность обогащается медью). После того как поверхность бронзы и стали покроется медью, растворение прекращается, устанавливается режим избирательного переноса. В узлах трения компрессора домашнего холодильника медная пленка на поверхностях трения в паре сталь—сталь возникла в результате растворения медных трубок охладителя компрессора. Ионы меди, поступая в масляно-фреоновую смесь, двигались в зону контакта, где формировалась защитная медная пленка. Компрессоры холодильников могут работать без ремонта десятки лет.

Многообразие видов разрушения деталей при трении связано со сложными физико-химическими процессами в зоне контакта, за-

висящими главным образом от окружающей среды, условий трения (скорости скольжения, давления, температуры) и применяемых материалов. В течение длительного времени главным направлением борьбы с изнашиванием и уменьшением силы трения было повышение твердости поверхности трения деталей машин. В этом случае уменьшается взаимное внедрение одной поверхности в другую, снижаются пластические деформации и окислительные процессы, а также действие абразива. Разработано много методов повышения твердости деталей: цементирование, азотирование, хромирование, цианирование, поверхностная закалка, наплавка твердыми материалами и др. Многолетний опыт свидетельствует, что это позволило повысить надежность и долговечность трущихся деталей. Так, электролитическое хромирование цилиндров двигателей внутреннего сгорания не только повысило износостойкость пары цилиндр–поршневое кольцо в 4–5 раз в сравнении с износостойкостью чугунных цилиндров, но и в большой степени снизило потери на трение в цилиндропоршневой группе двигателей.

Однако увеличение нагрузок в узлах трения, ухудшающих в некоторых случаях условия смазывания деталей с применением в машинах специальных смазочных жидкостей, а в некоторых механизмах и традиционные методы повышения износостойкости деталей путем увеличения их твердости перестали себя оправдывать. Напомним, что фактическая площадь контакта с увеличением твердости материала уменьшается. В результате неизбежных перекосов деталей при эксплуатации увеличивается возможность их заедания или роста интенсивности изнашивания.

Самоорганизация в узлах трения. В поисках новых путей повышения износостойкости деталей машин целесообразно обратиться к живой природе, например к таким закрытым узлам трения, как суставы живых организмов: здесь кость покрыта мягким хрящом, на поверхности которого имеется тонкая подвижная полимерная пленка. Таким образом, в суставе в паре трения работают два одинаковых материала, причем мягкий по мягкому. Подобные пары трения у живых организмов являются универсальными узлами, обладающими «безызносностью». Известно, что биологические системы обладают способностью к самовосстановлению и могут работать десятки лет без износа.

В соответствии с термодинамикой неравновесных процессов новые структуры могут возникать в природе в тех случаях, когда выполняются следующие четыре необходимых условия:

- система является термодинамически открытой, т. е. может обмениваться веществом m и (или) энергией E со средой;
- динамические уравнения системы нелинейны;
- отклонение от равновесия превышает критическое значение;
- микроскопические процессы происходят кооперированно (согласованно).

Второй закон термодинамики связан с первым условием: в системах, способных к формированию структур, он не нарушается, а лишь проявляется в более общем виде. Второе и третье условия указывают, что нужно отойти от привычных линейных физических представлений и вступить в нелинейную область, где при определенных условиях упорядочение может произойти самопроизвольно. Четвертое условие отражает причинность образования процессов, идущих на микроскопическом уровне, при наличии особых связей, которые ведут к спонтанному возникновению структур.

Самоорганизация не является универсальным свойством материи и существует лишь при определенных внутренних и внешних условиях. Вместе с тем это свойство не связано с каким-то особым классом веществ. Узел трения в неживой природе удовлетворяет требованиям самоорганизации. Он представляет собой открытую систему. К нему подводится энергия от электродвигателя, вращающего механизм, или от двигателя внутреннего сгорания. Как правило, узлы трения смазываются. Смазочный материал состоит из множества одинаковых элементов, в данном случае — молекул. В нем могут быть мицеллы, ионы металлов. Все это создает условия для самоорганизации новых структур.

Ранее полагали, что трение является разрушительным процессом. Обратное утверждение считалось абсурдом, как и создание узла трения, который бы не изнашивался. Однако природа позаботилась и о машинах.

Рассмотрим один из примеров самоорганизации — узел трения компрессора бытового холодильника. Компрессор холодильника, как уже отмечалось, работает десятки лет в тяжелых условиях (постоянные пуски и остановки) практически без износа. Трущиеся детали выполнены из стали, смазочным материалом служит смесь 50 % масла и 50 % фреона. В процессе работы на поверхностях трения — шейках коленчатого вала (шатунной и коренных), сопряженных подшипниках, поршне и цилиндре — самопроизвольно образуется тонкая медная пленка толщиной 1–2 мкм. Пленка формируется из ионов меди,

образующихся в смазочном материале в результате незначительного растворения медных трубок охладителя. К месту контакта деталей трения ионы приносит охлаждающая смесь, являющаяся также смазочным материалом (рис. 3.6).

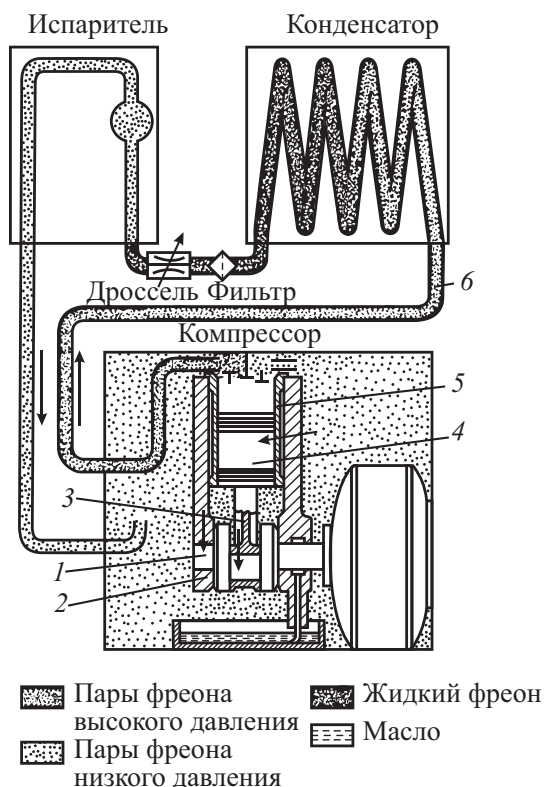


Рис. 3.6. Схема смазывания компрессора бытового холодильника:

1 — коленчатый вал; 2 — подшипники коленчатого вала; 3 — шатун; 4 — поршень; 5 — цилиндр; 6 — змеевик из медных трубок; места отложения меди (на шейках вала) показаны стрелками

Активность масляно-фреоновой смеси по отношению к медным трубкам охладителя повышается в результате образования в зоне трения при начальной работе компрессора слабых кислот (окисление масла). После того как в зоне контакта образуется пленка меди, условия трения деталей изменяются: снижается давление, уменьшается сила трения и падает температура. Процессы, в результате которых образуется пленка меди (окисление масла и растворение трубок), могут прекратиться.

Таким образом, можно отметить следующую цепочку взаимообусловленных явлений, происходящих в смазочной системе компрессора и на поверхностях трения деталей:

1. Начальный период: в паре трения сталь—сталь смазочный материал окисляется; образующиеся кислоты растворяют поверхностные слои медных трубок и доставляют в смазочную систему ионы меди; ионы меди, циркулируя в смазочной системе, осаждаются на поверхности деталей только в зоне трения; в результате образуется тонкая пленка меди, покрывающая поверхности трения.

2. Установившийся режим:

- после того как поверхности трения покроются пленкой меди, пара трения сталь—сталь заменяется парой медь—медь, что приводит к снижению интенсивности окисления масляно-фреоновой смеси, прекращается растворение трубок (структура медной пленки и ее антифрикционные свойства описаны ниже);
- в случае нарушения сплошности медной пленки режим работы сопряжения становится более тяжелым, что вызывает усиление окислительных процессов в смазочном материале и, как следствие, растворение меди трубок и «залечивание» поврежденной поверхности; автоматизм защиты поверхностей трения от изнашивания обеспечивает длительную безызносную работу компрессора.

В установившемся режиме трения медная пленка не разрушается. Она может переходить с одной поверхности трения на другую. Продукты изнашивания удерживаются в зазоре электрическими силами.

На основании рассмотренного примера можно утверждать, что трение сопровождается эволюционными процессами, в результате которых разрушение поверхностей становится второстепенным. Главным выступает созидательный характер трения, который обусловлен обменом узла трения с внешней средой энергией и веществом, а также кооперативным поведением ионов меди, из которых формируется медная пленка, защищающая поверхности трения от изнашивания.

Металлическую защитную пленку, образующуюся в процессе трения, называют сервовитной (от лат. *servowitte* — спасти жизнь). Она представляет собой вещество (в данном случае металл), образованное потоком энергии и существующее в процессе трения. Трение не уничтожает пленку, оно ее создает. Образование защитной пленки отно-

сится к новому классу самоорганизующихся явлений неживой природы. Их изучение началось сравнительно недавно.

При деформировании сервовитная пленка не разрушается и не подвергается усталостному разрушению. Она воспринимает все нагрузки, покрывая шероховатости поверхностей трения стальных деталей, которые практически не участвуют в процессе трения. В этих условиях мягкий материал работает по мягкому. Нагрузка распределяется равномерно по поверхности трения, поэтому на единицу площади она незначительна, что способствует продлению ресурса узла трения.

В зависимости от вида материалов, участвующих в работе пары трения, и условий трения механизм формирования сервовитной пленки на поверхностях трения может быть различным:

1. Формирование пленки в паре трения бронза—сталь при смазывании глицерином. Глицерин является модельной жидкостью, которая легче других реализует режим избирательного переноса (ИП) при трении пары бронза—сталь. В первый период работы пары происходит растворение поверхности трения бронзы. Глицерин действует при трении как слабая кислота. Атомы легирующих элементов бронзы (олово, цинк, железо, алюминий и др.) уносятся в смазочный материал, в результате поверхность бронзы обогащается атомами меди. После этого деформация ее при трении вызывает диффузионный приток новых атомов легирующих элементов к поверхности, которые также уходят в смазочный материал. Таким образом, поверхностный слой бронзы освобождается от легирующих элементов и становится в основном медным. В нем образуется большое количество вакансий, часть из них соединяется, образуя поры, которые заполняются молекулами глицерина.

Поскольку глицерин является восстановителем окиси и закиси меди, поверхность трения медной пленки свободна от окисных пленок, она очень активна и способна к схватыванию со стальной поверхностью, т. к. имеет свободные связи. В результате стальная поверхность постепенно покрывается тонким слоем меди. Слой меди, образующийся на бронзовой поверхности, утончается вследствие его переноса на стальную поверхность, поэтому происходит дальнейшее растворение бронзы. Такой процесс продолжается до тех пор, пока на стальной и бронзовой поверхностях не образуется слой меди толщиной 1–2 мкм.

После того как медная пленка покрывает бронзовую и стальную поверхности, молекулы глицерина уже не могут взаимодействовать

с бронзой и «вытягивать» атомы легирующих элементов, процесс растворения бронзы прекращается и наступает установившийся режим ИП.

В процессе приработки в случае ограниченного объема смазочного материала в нем могут образовываться мицеллы—частицы меди, окруженные плотным кольцом молекул смазочного материала. Мицеллы имеют заряд, что удерживает их в зазоре. Иногда по каким-либо причинам мицеллы выходят из зазора; тогда под действием электрического поля они попадают в узкие щели, например между испытуемым образцом и подложкой или под головкой болта, крепящего образец, и там образуют тонкую пленку меди.

Образование пленки меди на бронзовой поверхности происходит в результате электрохимического процесса — процесса растворения металла. Вследствие образования сервовитной пленки между анодными и катодными участками поверхности бронзы процесс растворения может полностью прекратиться, далее наступит установившийся режим трения. Если по каким-либо причинам медная пленка разрушится, то вновь произойдет растворение бронзы и поверхность будет обогащаться медью, пока снова не наступит пассивное состояние.

2. Сервовитная пленка может образовываться в узле трения сталь—сталь при работе с металлоплакирующими смазочными материалами, содержащими мелкие частицы бронзы, меди, свинца, серебра и др. При использовании смазки ЦИАТИМ-201 с добавками порошков меди, бронзы или латуни, а также свинца в паре сталь—сталь поверхности деталей покрываются тонкой пленкой, состоящей из металла применяемых порошков. В процессе работы порошки частично растворяются в смазочном материале и в результате восстановления окисных пленок прочно схватываются со сталью, образуя сервовитную пленку, которая содержит в порах смазочный материал. Коэффициент трения при высоких нагрузках уменьшается, а стальные поверхности не изнашиваются. При трении сдвиг поверхностей трения происходит внутри образующихся пленок по диффузионно-вакансионному механизму. При хорошо восстанавливающихся свойствах смазочного материала можно для реализации ИП вводить закись или окись меди. Сервовитная пленка образуется в результате восстановления окислов меди в процессе трения.

3. Разработан ряд порошковых материалов, работающих в режиме ИП. Шихта для таких материалов готовится из тонкодисперсных

смесей порошков ВК3, ВК6, ВК8. В качестве связующего материала применяют сплавы, содержащие медь (главным образом медно-никелевые сплавы), которые обладают жидкотекучестью и обеспечивают высокую прочность порошковых материалов. Последние могут работать в режиме ИП при смазывании узла трения нефтью, нефтепродуктами и сточными водами. Сервовитная пленка образуется на поверхности твердых составляющих сплава в результате механического выдавливания мягкой составляющей и ее последующего растворения. Сплавы способны работать в одноименной паре. Такое сочетание материалов работоспособно только благодаря образованию сервовитной пленки, которая обеспечивает смазывание твердых составляющих порошковой композиции. Эти составляющие без пленки меди не выдерживают нагрузки — происходят задиры поверхностей.

4. Сервовитная пленка может образоваться при трении политетрафторэтилена (ПТФЭ), наполненного закисью меди, по стали при смазывании глицерином в результате восстановления закиси меди до чистой меди. Стальная поверхность покрывается слоем меди. Сервовитная пленка меди обнаружена на упорных подшипниках скольжения турбин и турбокомпрессоров. Подшипник состоит из упорного стального гребня, неподвижно закрепленного на вращающемся валу, и корпуса, внутри которого размещены по окружности плавающие подушки (сегменты), изготовленные из бронзы с наплавкой баббитового слоя. Такая конструкция, известная под названием подшипников А. Мичелла, применяется в упорных подшипниках скольжения.

5. Эффективным вариантом образования и использования сервовитной пленки оказалось нанесение на поверхность бронзового сегмента бронзофторопласта путем напекания слоя порошка оловянной бронзы и пропитки его суспензией фторопласта-4. На слое фторопласта и сопряженной стальной поверхности образовывалась сервовитная пленка, что обусловило значительно большую износостойкость и надежность работы новых подшипников.

Итак, основные структурные факторы, которые проявляются при ИП и обеспечивают малые силы трения и безызносность, состоят в следующем:

1. *Осуществление контакта поверхностей трения через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой меди.*

При обычном трении как без смазочного материала, так и при наличии граничной смазочной пленки детали контактируют на очень

малой площади, составляющей $0,01-0,0001$ номинальной площади сопряженных поверхностей. В результате участки фактического контакта испытывают высокие напряжения, что приводит к их взаимному внедрению, пластической деформации и, следовательно, к интенсификации изнашивания. Из приведенных на рис. 3.7 схем контакта стальной и бронзовой деталей видно, что если при граничной смазке контакт сопряженных поверхностей происходит только в отдельных точках, то при ИП он осуществляется через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой меди. В результате площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, а материал деталей испытывает лишь упругие деформации.

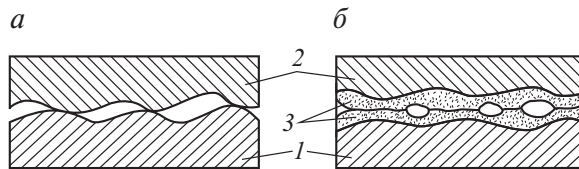


Рис. 3.7. Схемы контакта деталей при граничной смазке (а) и ИП (б):

1 — сталь; 2 — бронза; 3 — пленка меди

Толщина сервовитной пленки достигает $1-2$ мкм, что соответствует размерам неровностей (или перекрывает их) большинства деталей общего машиностроения. При граничной смазке взаимодействие неровностей поверхностей вызывает усталостное изнашивание. При ИП трение непрерывное, площадки действительного контакта плоские. Имеющиеся методы определения площадей контакта, формулы сближения поверхностей, кривые опорной поверхности, а также методы и приборы для исследования свойств контакта не годятся для условий ИП.

2. Предотвращение процесса окисления металла на поверхности трения. При трении с граничной смазкой и трении без смазочного материала поверхности деталей всегда покрыты окисными пленками, которые, как известно, предотвращают непосредственный контакт металлических поверхностей и их схватывание. Однако окисные пленки хрупки, не способны многократно деформироваться и поэтому в процессе трения разрушаются в первую очередь. С повышением температуры в зоне трения окисные пленки утолщаются, но при этом увеличивается и объем их разрушения. В режиме ИП трение происходит без окисления поверхностей и поэтому не сопровождается образованием окисных пленок.

Поверхности защищаются от окисления плотными слоями положительно заряженных адсорбированных поверхностно-активных веществ, которые образуются в процессе трения и предотвращают поступление кислорода к сервовитной пленке. Отсутствие окисных пленок способствует образованию хемосорбционных процессов, что дает дополнительную защиту от изнашивания.

При обычном (граничном) трении окисные пленки препятствуют выходу дислокации на поверхность, что ускоряет наклеп поверхностного слоя и его разрушение. Сервовитная пленка не подвержена наклепу и может многократно деформироваться без разрушения, т. к. при отсутствии окисных пленок дислокации в ней легко аннигилируют.

3.5.2. Реализация эффекта безызносности

Образование продуктов полимеризации смазочного материала на поверхности сервовитной пленки. Для повышения несущей способности смазочной пленки при трении в смазочный материал вводят специальные добавки (например, смесь метилового эфира многоосновной кислоты и полиаминов), которые при трении полимеризуются и создают на поверхностях трения дополнительный защитный слой, предотвращающий их непосредственный контакт. Однако в условиях граничной смазки такая пленка образуется с трудом, т. к. окисная пленка, будучи инактивной, препятствует реакции поликонденсации и полимеризации (рис. 3.8, *а*). При ИП окисные пленки отсутствуют, а сервовитная пленка является мощным катализатором полимеризации. Полимерная пленка образуется из свободных радикалов органических веществ, которые возникают в процессе трибодеструкции смазочного материала (рис. 3.8, *б*); она предотвращает непосредственный контакт металлических поверхностей и снижает контактные давления.

За последние 40 лет использование эффекта безызносности (ИП) значительно расширилось. В настоящее время большинство областей машиностроения или приборостроения применяют или апробируют ИП, который проявляется при трении стали по стали и по чугуну, чугуна по чугуну, стали по порошковому материалу, металлополимеру, стеклу, бронзе, алюминиевым сплавам.

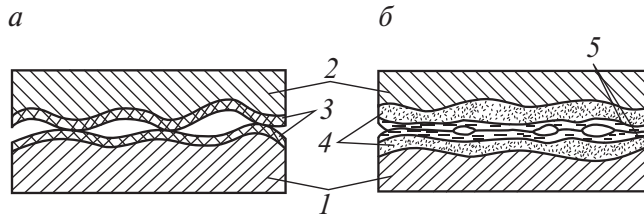


Рис. 3.8. Схемы контакта деталей при наличии смазочного материала со специальными присадками при граничной смазке (а) и ИП (б):

1 — сталь; 2 — бронза; 3 — окисные пленки; 4 — сервовитные пленки;
5 — полимерные пленки

Тяжело нагруженные опоры качения. Частыми причинами выхода из строя опор качения являются усталостное выкрашивание дорожек и тел качения, заклинивание и разрыв сепараторов, абразивное изнашивание. При эксплуатации опор качения указанные повреждения в ряде случаев могут быть устранены или уменьшены при использовании металлоплакирующих смазочных материалов.

Долговечность опор качения с линейным контактом тел качения и колец обратно пропорциональна нагрузке на более нагруженное тело в степени 3,3. Снижение этой нагрузки на 10 % повышает долговечность подшипника на 36 %. Создание между телом качения и кольцом подшипника металлической пленки увеличивает площадь контакта и тем самым снижает максимальную нагрузку на тело качения. Сервовитная пленка толщиной 0,5–1 мкм может увеличить даже при достаточно большой нагрузке площадь контакта в 1,5–2 раза, что отразится на долговечности подшипника (рис. 3.9).

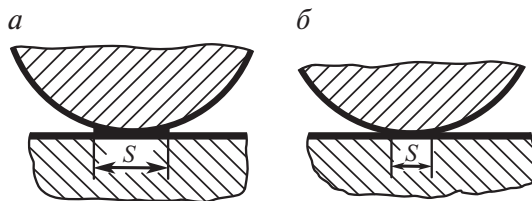


Рис. 3.9. Схемы контакта ролика с кольцом подшипника при наличии сервовитной пленки (а) и без нее (б)

При низких скоростях скольжения или при использовании твердых смазочных материалов потери в подшипниках качения снижаются. Потери на трение при работе подшипника возникают не только в результате деформации поверхностного слоя тел качения и колец,

но и вследствие трения в сепараторе, вращения шариков; однако потери при деформации играют главную роль. В качестве твердых смазочных материалов для подшипников качения применяют графит и молибденит, реже дисульфид вольфрама или нитрид бора.

При использовании твердого смазочного материала в подшипниках качения трудно удержать его на поверхностях трения. Применяют разные способы нанесения порошкообразных материалов на поверхности деталей подшипника: втирание (шаржирование), вбивание (галтовка в барабане) и др. Главный недостаток твердых пленочных покрытий — быстрое их изнашивание и, как следствие, небольшой срок службы подшипника. Для улучшения работы подшипника качения применяют сепараторы из самосмазывающихся материалов на основе порошковых материалов или полимеров. Такие подшипники более работоспособны. Чаще их используют в приборах. В тяжело нагруженных узлах такие подшипники не нашли применения.

Металлоплакирующие смазочные материалы позволяют реализовать ИП в подшипниках качения и тем самым повысить их ресурс и нагрузочную способность. Применение таких материалов для смазывания роликовых подшипников, подшипников автомобилей и самолетов дало положительные результаты.

Избирательный перенос, кроме приведенных примеров, используется в червячных передачах, в узлах трения автомобилей, бурового, нефтепромыслового и химического оборудования, в литейных и текстильных машинах, машинах и аппаратах бытовой техники и др.

4. Антифрикционные материалы на основе цветных металлов

.....

Антифрикционные материалы используются для уменьшения потерь на трение и повышения долговечности трущихся поверхностей машин и механизмов. Трение происходит в подшипниках скольжения между валом и вкладышем подшипника. Поэтому для вкладыша подшипника подбирают такой материал, который предохраняет вал от износа, сам минимально изнашивается, создает условия для оптимальной смазки и уменьшает коэффициент трения.

Антифрикционными сплавами служат цветные сплавы на основе олова, свинца, меди, алюминия или цинка, обладающие специальными антифрикционными свойствами и предназначенные для изготовления подшипников скольжения. К антифрикционным сплавам относят также серые чугуны и металлокерамические материалы.

Подшипник скольжения в общем виде представляет собой втулку (рис. 4.1, *а*), в которой вращается шейка вала или ось на слое смазки. Такие подшипники воспринимают радиальную, осевую и редко радиально-осевую нагрузки. Для нормальной работы таких подшипников слой смазки должен быть оптимальным и пополняться периодически или подаваться в зону трения непрерывно под давлением. В сравнении с подшипниками качения подшипники скольжения в машиностроении применяются меньше, но есть области техники, в которых их используют традиционно. Это относится к разъемным подшипникам-вкладышам (рис. 4.1, *б*) коленчатых и распределительных валов двигателей внутреннего сгорания, опорам быстроходных точных приборов и опорам тихоходных устройств, подвергаемых большим ударным и вибрационным нагрузкам, а также к подшипникам из двух половин с заливкой (рис. 4.1, *в*), работающим в воде, агрессивных средах и загрязненной смазке.

По конструкции подшипники скольжения могут быть разнообразными: цельными и разъемными, самоустанавливающимися и шарнирными, с постоянным и регулируемым зазором, со смазочной канавкой и без канавки, с предварительным закреплением антифрикционного слоя и с его заливкой в процессе сборки. В прецизионных устройствах (высокоточные станки) опорой валов может быть, например, сжатый воздух. Валы вращаются с частотой от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч оборотов в минуту и приводятся в действие электромагнитным устройством.

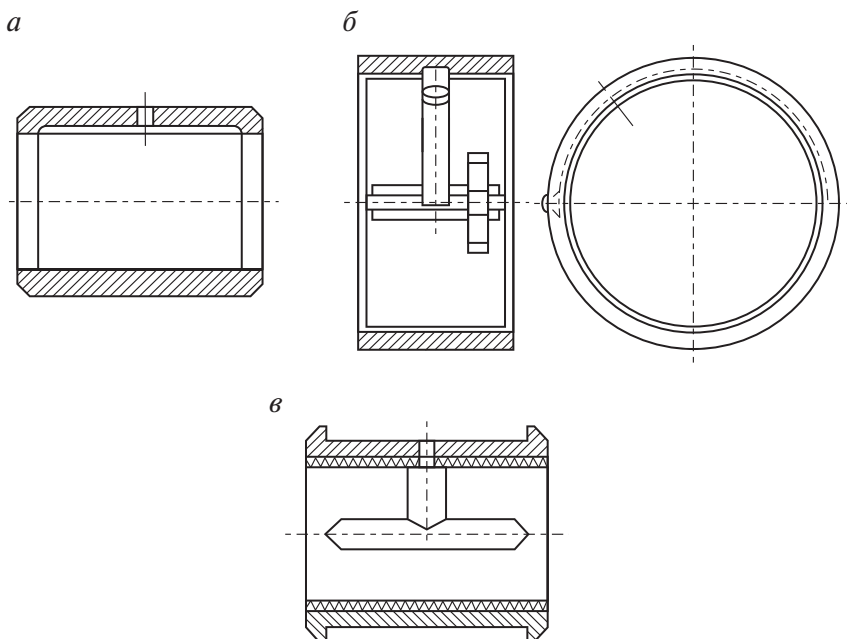


Рис. 4.1. Подшипники скольжения:

a — в виде втулки; *б* — разъемный подшипник-вкладыш;
в — из двух половин с заливкой

Материалы для подшипников скольжения разделяют на следующие группы:

- металлические — баббиты; бронзы; сплавы на основе алюминия, цинка, свинца; чугуны;
- спеченные графитно-металлические материалы;
- неметаллические — пластмассы, резины, пластики и др.

4.1. Принципы выбора антифрикционных материалов

К подшипниковым антифрикционным материалам предъявляются следующие требования:

- хорошая начальная прирабатываемость к сопрягаемой детали;
- небольшой коэффициент трения;
- способность работать при достаточно высоких нагрузках, скоростях вращения и температурах без выдавливания, размягчения, выкрашивания;
- способность удерживать смазку на рабочей поверхности и образовывать самосмазывающие или легко притирающиеся коллоидные продукты истирания;
- более низкая, чем у шейки вала, твердость;
- высокая теплопроводность, достаточная для интенсивного отвода тепла от зоны трения;
- высокая ударная вязкость в случае работы при ударных нагрузках.

Подшипниковые материалы должны быть по возможности дешевыми.

Таким, часто взаимоисключающим, требованиям наилучшим образом удовлетворяют металлические сплавы с гетерогенными структурами, отвечающими правилу Шарпи для двух типов структур сплавов: твердые фазы в более мягкой основе или, наоборот, мягкие включения в более твердой основе. Наиболее благоприятны условия работы подшипников скольжения при мелкозернистой однородной структуре.

Из антифрикционных сплавов наиболее широко применяют баббит, бронзу, алюминиевые сплавы, чугуны. Антифрикционные сплавы хорошо прирабатываются в парах трения благодаря мягкой основе — олову, свинцу или алюминию. Более твердые металлы и их соединения (цинк, медь, сурьма), растворенные в основе или вкрапленные в ней, способны выдерживать большие нагрузки. После приработки и частичной деформации мягкой основы в ней образуются углубления, способные удерживать смазку, необходимую для нормальной работы пары.

К сплавам первого типа относятся антифрикционные материалы, представляющие собой сочетание достаточно прочной и пластичной основы, в которой имеются опорные (твердые) включения. При трении пластичная основа обеспечивает хорошую прирабатываемость

и смягчение ударов, частично изнашивается, а вал опирается на твердые включения, воспринимающие нагрузку. В этом случае трение происходит не по всей поверхности подшипника, а смазка удерживается в изнашивающихся местах пластичной основы. Такими сплавами служат сплавы на основе олова, свинца, меди, алюминия или цинка, обладающие перечисленными антифрикционными свойствами — баббиты и сплавы на основе меди — бронзы и латуни (табл. 4.1). Мягкая матрица в них обеспечивает не только защитную реакцию подшипникового материала на усиление трения и хорошую прирабатываемость, но и особый микрорельеф поверхности, улучшающий снабжение смазочным материалом участков трения и теплоотвод с них. Твердые включения, на которые опирается вал, обеспечивают высокую износостойкость.

К сплавам *второго типа* относятся свинцовистая бронза БрС30 (30 % Pb) (ГОСТ 493–79) и алюминиевые сплавы с оловом, например сплав АО9-2 (9 % Sn, 2 % Cu). Функцию мягкой составляющей в этих сплавах выполняют включения свинца или олова. К сплавам второго типа относятся также серые чугуны, роль мягкой составляющей в которых выполняют включения графита.

Таблица 4.1

Характеристики основных антифрикционных материалов

Материал	HB, МПа·10 ⁻¹	Коэффициент трения по стали		Допустимый режим работы		
		без смазоч- ного мате- риала	со смазоч- ным мате- риалом	<i>p</i> , МПа	<i>v</i> , м/с	<i>p</i> , МПа·м/с
Баббиты:						
Б83	300	0,07—0,12	0,004—0,006	15	50	750
Б16	300			10	30	300
БК2	320			15	15	225
Бронзы:						
БрО10Ф1	1000	0,1—0,2	0,004—0,009	15	10	150
БрО5Ц5С5	600			8	30	240
БрС30	250			25	12	240
Латуни:						
ЛЦ16К4	1000	0,15—0,24	0,009—0,016	12	2	24
ЛЦ38Мц2С2	800			10,6	10	100
Алюминиевый сплав АО9-2	310	0,1—0,15	0,008	25	10	250

Окончание табл. 4.1

Материал	НВ, МПа·10 ⁻¹	Коэффициент трения по стали		Допустимый режим работы		
		без смазоч- ного мате- риала	со смазоч- ным мате- риалом	<i>p</i> , МПа	<i>v</i> , м/с	<i>p</i> , МПа·м/с
Антифрикционные серые чугуны:						
АЧС-1	2200	0,12—0,23	0,008	2,5	5	12,5
АЧС-3	1600		0,016	6	0,75	4,5
Пластмассы:						
капрон	100	0,15—0,21	—	12	5	20
текстолит	350	0,15—0,25	—	15	8	25
Комбинированные материалы:						
железо — графит	800	0,08—0,12	—	8	1	8
бронза — графит	560	0,04—0,1	—	6	1	—
металлофторпласто- вая лента (МФПл)	—	0,03—0,1	—	—	—	150

4.2. Баббиты

Баббиты — мягкие (≈ 30 НВ) антифрикционные сплавы на оловянной или свинцовой основе, предназначенные для заливки или напыления вкладышей подшипников скольжения. В соответствии с ГОСТ 1320–74 по химическому составу баббиты классифицируют на три группы: оловянные, оловянно-свинцовые и свинцовые. Последние не имеют в своем составе олова. К сплавам на оловянной основе относятся баббиты Б83 (83 % Sn, 11 % Sb, 6 % Cu) и Б88, на свинцовой основе — Б16 (16 % Sn, 16 % Sb, 2 % Cu), БС6 и БН. Особую группу образуют более дешевые свинцово-кальциевые баббиты: БКА и БК2 (ГОСТ 1209–90). Некоторые марки баббита содержат сурьму, медь, никель, мышьяк, кадмий, теллур, кальций, натрий, магний и др. Баббиты являются лучшими антифрикционными сплавами. Их применяют для заливки вкладышей подшипников скольжения, работающих при больших окружных скоростях и при переменных и ударных нагрузках, например, для быстроходных валов турбогенераторов тепловых электростанций.

Баббит изобретен в 1839 г. И. Баббитом (I. Babbitt, США). Высокие антифрикционные свойства баббита обуславливаются его особой

гетерогенной структурой, характеризующейся наличием твердых частиц в мягкой пластичной основе сплава. Микроструктура оловянного баббита Б83 (рис. 4.2, к сопрягаемой детали) состоит из мягкой основы, представляющей собой твердый раствор сурьмы в олове (темный фон — мягкая фаза). Твердыми частицами являются кубические включения β (SnSb) и игольчатые кристаллы включений Cu_3Sn .

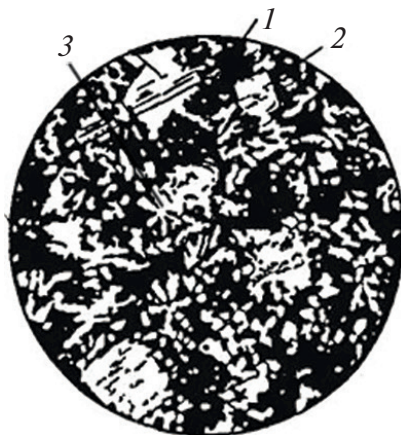


Рис. 4.2. Микроструктура оловянного баббита Б83, $\times 200$:

1 — мягкая основа (α -твердый раствор), 2 — кубические включения β (SnSb),
3 — игольчатые кристаллы β (Cu_3Sn)

Поскольку баббиты применяются обычно в литом виде, то они склонны к ликвации по удельному весу (более легкие включения фазы β могут быть сосредоточены в верхней части отливки). Медь, образуя кристаллизующиеся первыми тугоплавкие соединения Cu_3Sn , предотвращает всплывание β -кристаллов. Возможность формирования равномерной дисперсной структуры баббитов с благоприятной глобулярной морфологией структурных составляющих и высокими эксплуатационными характеристиками можно реализовать с помощью ускоренного охлаждения при заливке и использования методов центробежного литья и механического перемешивания расплава (например, турбулентным способом) (рис. 4.3).

Баббит отличается низкой температурой плавления ($300\text{--}440\text{ }^\circ\text{C}$), хорошей прирабатываемостью. По антифрикционным свойствам оловянные баббиты превосходят все остальные сплавы, но значительно уступают им по сопротивлению усталости. В связи с этим баббиты применяют только для тонкого (менее 1 мм) покрытия рабочей

поверхности опоры скольжения. Наилучшими свойствами обладают оловянистые баббиты, у которых $pV = (500...700) \cdot 10^5$ Па·м/с. Из-за высокого содержания дорогостоящего олова их используют для подшипников ответственного назначения (дизелей, паровых турбин и т. п.), работающих при больших скоростях и нагрузках (см. табл. 4.1), когда от антифрикционного материала требуется повышенная вязкость и минимальный коэффициент трения. Оловянные баббиты Б88, Б83, Б83 С (SAE11, SAE12, ASTM2), по сравнению со свинцовыми обладают более высокой коррозионной стойкостью, износоустойчивостью и теплопроводностью, а также более низким коэффициентом линейного расширения.

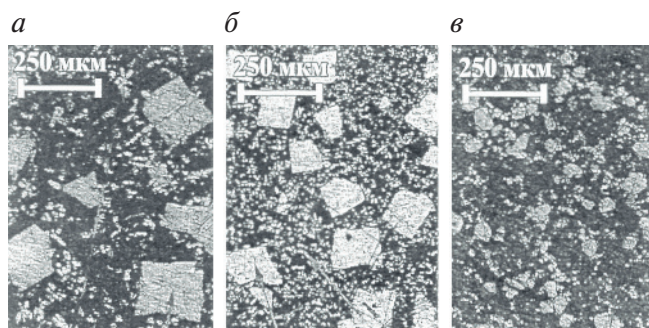


Рис. 4.3. Микроструктура баббита Б83, полученного разными способами литья:
а — сифонным; б — центробежным; в — турбулентным (по В. В. Илюшину)

Свинцовые баббиты, например сплав Б16, разработанный А. М. Бочваром, применяют как заменитель баббита Б83 для вкладышей подшипников, электродвигателей, паровых турбин, не испытывающих ударных нагрузок. В сравнении с оловянными баббитами свинцовые обладают большим коэффициентом трения. Они более хрупки, так как в них мягкой составляющей является достаточно хрупкая эвтектика, зато они могут работать при более высокой температуре подшипника, чем оловянные. Баббиты на основе свинца имеют несколько худшие антифрикционные свойства, чем оловянные, но они дешевле и менее дефицитны. Свинцовые баббиты применяют в подшипниках, работающих в более легких условиях. В марках баббитов цифра показывает содержание олова. Например, баббит БС6 содержит по 6 % олова и сурьмы, остальное — свинец. Свинцовый баббит применяют для заливки подшипников двигателей автомобилей, тракторов, прокатных станов, моторно-осевых подшипников электровозов, путевых

машин, деталей тепловозов и другого оборудования транспортного машиностроения. Допустимое рабочее давление $P_m = 10$ МПа. Свинцово-кальциевый баббит применяют для заливки подшипников подвижного состава железнодорожного транспорта.

Все баббиты имеют существенный недостаток — низкое сопротивление усталости, что ухудшает работоспособность подшипника. Из-за небольшой прочности баббиты могут успешно эксплуатироваться только в подшипниках, имеющих прочный стальной (чугунный) или бронзовый корпус. Обычно тонкостенные подшипниковые вкладыши автомобильных двигателей изготавливают штамповкой из биметаллической ленты, полученной на линии непрерывной заливки. Продолжительность работы подшипников зависит от толщины баббитового слоя, залитого на стальной вкладыш. Уменьшение толщины слоя увеличивает срок службы подшипника.

4.3. Сплавы меди

Медь образует непрерывные твердые растворы с соседними по таблице Д. И. Менделеева элементами: золотом, никелем, палладием, платиной, а также с марганцем.

Из металлов, образующих с медью непрерывный ряд твердых растворов, для легирования используют лишь никель и марганец; остальные — редки, дефицитны и дороги. Элементы, сильно отличающиеся по строению и свойствам от меди (Ti, Pb, Se, Te), полностью не смешиваются с ней даже в жидком состоянии.

Важнейшими антифрикционными сплавами на основе меди являются бронзы и латуни.

4.3.1. Бронзы

Бронзы относятся к лучшим антифрикционным сплавам.

Бронзами называют сплавы меди с оловом, с алюминием, кремнием, железом, бериллием и другими элементами, т. е. все сплавы меди, кроме сплавов с цинком — латуней и медно-никелевых сплавов. При этом бронзы условно делят на два класса: оловянные (с обязательным

присутствием олова) и безоловянные. По основным легирующим элементам их подразделяют на оловянные, алюминиевые, бериллиевые, свинцовые, кремнистые и т. д.

Бронзы маркируют буквами «Бр», после чего указывают основные легирующие элементы и их содержание в сплаве, так же как для латуней. Цинк в бронзах маркируют буквой Ц, фосфор — Ф, бериллий — Б, хром — Х. Так, деформируемая бронза БрАЖМц10-3-1,5 легирована 10 % Al, 3 % Fe и 1,5 % Mn; остальное — медь. Если составы литейной и деформируемой бронз перекрываются, то в конце марки литейной латуни стоит буква Л, например БрА9ЖЗЛ.

4.3.1.1. Оловянные бронзы

Оловянные (или другое часто встречающееся наименование *оловянистые*) бронзы применяют с древнейших времен, и они хорошо освоены промышленностью. Их структура определяется диаграммой состояния Cu-Sn (рис. 4.4). На основе меди образуется α -твердый раствор с большой областью гомогенности. С понижением температуры растворимость несколько увеличивается от 13,5 % при 798 °С до 15,8 % Sn в интервале температур 590–520 °С. При дальнейшем понижении температуры растворимость олова в меди уменьшается, особенно намного ниже 400 °С. Промежуточные β -, γ - и ϵ -фазы относятся к соединениям электронного типа с электронной концентрацией $3/2$, $21/13$ и $7/4$ соответственно. В классификации Юм–Розери δ -фаза соответствует обозначению γ . В сплавах системы Cu-Sn развивается значительная дендритная (внутрикристаллическая) ликвация, вследствие чего в производственных условиях неравновесная β -фаза появляется при концентрациях более 6–8 % Sn вместо 13,5 % по диаграмме состояния. При последующем охлаждении она испытывает эвтектоидный распад $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$, который затем сменяется эвтектоидным превращением $\gamma \rightarrow \alpha + \delta$. Эвтектоидный распад β - и γ -фаз происходит быстро, и обычно они не фиксируются при комнатной температуре. Эвтектоидное превращение $\delta \rightarrow \alpha + \epsilon$, напротив, протекает очень медленно, и δ -фаза сохраняется до комнатной температуры даже при довольно медленном охлаждении. В производственных условиях сплавы ведут себя так, как если бы растворимость олова в меди была постоянной и не менялась с температурой (см. пунктир на рис. 4.4).

Структура оловянных бронз одно- и двухфазного типа показана на рис. 4.5.

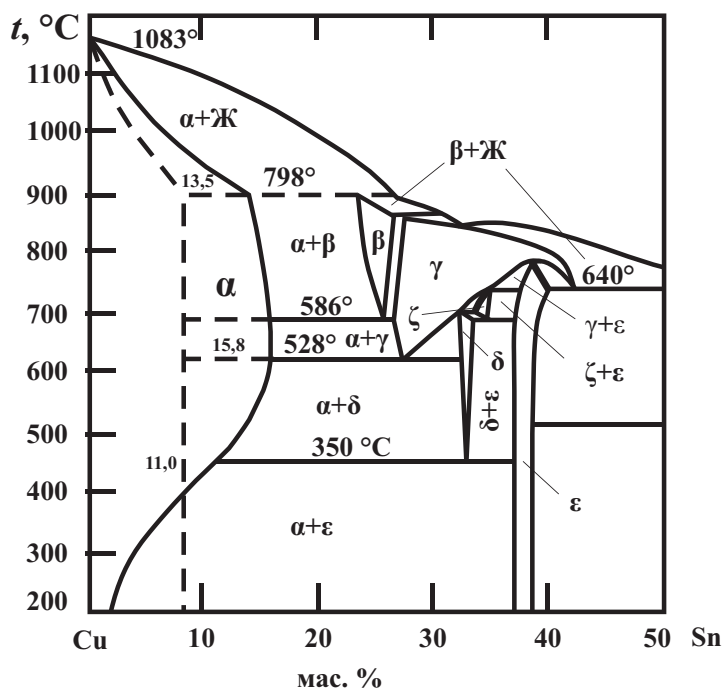
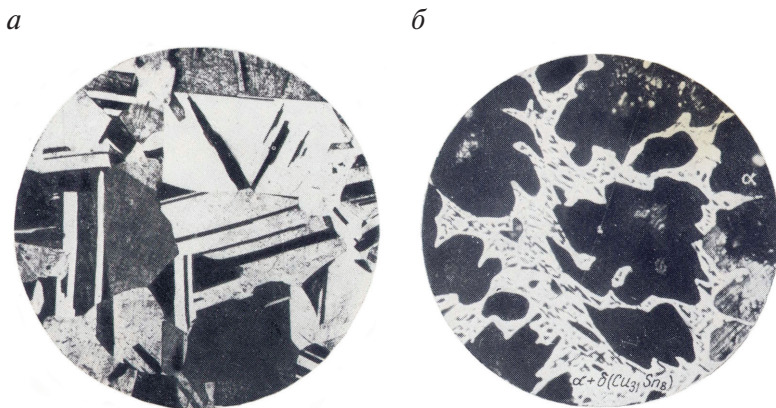


Рис. 4.4. Диаграмма состояния системы Cu-Sn

Рис. 4.5. Структура оловянных бронз с 5 % (а) и 10 % Sn (б):
а — $\times 200$; б — $\times 1000$

Бронзы отличаются невысокой жидкотекучестью из-за большого интервала кристаллизации. По этой же причине в бронзе не образуется концентрированная усадочная раковина, а возникает рассеянная

мелкая пористость. Линейная усадка у оловянных бронз очень невелика и составляет 0,8 % при литье в песчаную форму и 1,4 % при литье в кокиль. Указанные свойства бронз облегчают получение отливок, от которых не требуется высокая герметичность, а наоборот, применительно к вкладышам подшипников скольжения сохранение некоторой пористости желательно, т. к. способствует удержанию смазки на рабочей поверхности.

Бронзы с литой структурой обладают невысокой пластичностью, что обусловлено включениями твердой δ -фазы. В то же время включения твердого эвтектоида обеспечивают высокую стойкость бронз против истирания. Поэтому оловянные бронзы с достаточно высоким содержанием эвтектоида являются отличным антифрикционным материалом.

Для повышения пластичности бронзы гомогенизируют при 700–750 °С.

Пластичность бронз начинает резко снижаться при содержании олова более 8 %, когда в структуре появляется значительное количество δ -фазы. Временное сопротивление разрыву бронз повышается с увеличением содержания олова до 24 %, но при больших концентрациях резко снижается. Из-за появления слишком большого количества δ -фазы сплавы становятся хрупкими.

Оловянные бронзы по коррозионной стойкости в морской воде превосходят медь и медно-цинковые сплавы.

В оловянные бронзы часто вводят *фосфор*. Фосфор, во-первых, раскисляет медь и уменьшает содержание водорода в расплаве; во-вторых, повышает прочностные свойства; в-третьих, улучшает жидкотекучесть бронз и позволяет получать отливки сложной формы с тонкими стенками, в частности качественное художественное литье. Фосфор в бронзах с небольшим количеством олова повышает сопротивление износу из-за появления в структуре твердых частичек фосфида меди Cu_3P . Однако фосфор ухудшает технологическую пластичность бронз, поэтому в деформируемые сплавы вводят не более 0,5 % Р.

Для *оловянных и оловянно-фосфористых бронз* характерны высокие антифрикционные свойства: низкий коэффициент трения, небольшой износ, высокая теплопроводность, что позволяет подшипникам, изготовленным из этих материалов, работать при высоких окружных скоростях и нагрузках. Оловянные бронзы легируют *цинком* в больших количествах, но в пределах растворимости. При таких содержаниях цинк благоприятно влияет на свойства оловянных бронз:

- снижает склонность бронз к ликвации и повышает жидкотекучесть, поскольку он уменьшает температурный интервал кристаллизации сплавов;
- способствует получению более плотного литья;
- раскисляет расплав и уменьшает содержание в нем водорода;
- улучшает прочностные свойства бронз.

Никель повышает прочностные свойства и улучшает пластичность и деформируемость бронз, повышает их коррозионную стойкость, плотность, уменьшает ликвацию. Бронзы с никелем термически упрочняются закалкой и старением. *Свинец* повышает жидкотекучесть и плотность бронз, их антифрикционные свойства.

Естественно, желательно применять дешевые, недефицитные легирующие элементы. По этой причине в литейных бронзах стремятся уменьшать содержание олова за счет дополнительного легирования другими элементами.

По назначению оловянные бронзы можно разделить на несколько групп (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Механические свойства оловянных бронз

Группа	Бронза	Механические свойства*, не менее	
		σ_B , МПа	δ , %
Литейные стандартные	БрО3Ц12С5	210	5
	БрО5Ц5С5	170	4
	БрО4Ц4С17	150	12
	БрО4Ц7С5	180	4
	БрО3Ц7С5Н1	210	5
Литейные ответственного назначения	БрО10Ф1	250	3
	БрО10Ц2	230	10
	БрО8Ц4	200	10
	БрО6Ц6С3	180	4
	БрО10С10	200	6
	БрО5С255	140	6
Деформируемые	БрОФ8-0,3	390	55
	БрОФ6,5-0,4	300	60
	БрОФ6,5-0,15	300	38
	БрОФ4-0,25	300	40
	БрОЦ4-3	300	38
	БрОЦС4-4-2,5	300	35

* Для литейных сплавов — при литье в кокиль; для деформируемых сплавов — для отожженного листа.

Первая группа — литейные стандартные бронзы, предназначенные для получения разных деталей машин методами фасонного литья. К этим бронзам, помимо высоких литейных свойств, предъявляются следующие требования:

- хорошая обрабатываемость резанием;
- высокая плотность отливок;
- достаточная коррозионная стойкость;
- высокие механические свойства.

Вторая группа — литейные нестандартные бронзы ответственного назначения, обладающие высокими антифрикционными свойствами и хорошим сопротивлением истиранию. Эти сплавы применяют для изготовления подшипников скольжения и других деталей, работающих в условиях трения. Наибольшей прочностью в сочетании с высокими антифрикционными свойствами обладает бронза БрО10Ф1, что обусловлено высоким содержанием олова и легированием фосфором.

Третья группа — деформируемые бронзы, которые отличаются от литейных более высокой прочностью, вязкостью, пластичностью, сопротивлением усталости. Основные легирующие элементы в деформируемых бронзах — это олово, фосфор, цинк и свинец, причем олова в них меньше, чем в литейных бронзах. Деформируемые бронзы можно разделить на сплавы, легированные оловом и фосфором (БрОФ6,5-0,4; БрОФ6,5-0,15; БрОФ4-0,25), и сплавы, не содержащие фосфора (БрОЦ4-3 и БрОЦС4-4-2,5). Из этих бронз наилучшая обрабатываемость давлением у бронзы БрОЦ4-3. Бронза БрОЦС4-4-2,5, содержащая свинец, совсем не обрабатывается давлением в горячем состоянии из-за присутствия в ней легкоплавкой эвтектики. Эта бронза предназначена для изготовления деталей, работающих в условиях трения и поэтому легирована свинцом.

Основные виды термической обработки бронз — гомогенизация и промежуточный отжиг. Основная цель этих операций — облегчение обработки давлением. Гомогенизацию проводят при 700–750 °С с последующим быстрым охлаждением. Для снятия остаточных напряжений в отливках достаточно отжига при 550 °С длительностью 1 ч. Промежуточный отжиг при холодной обработке давлением проводят при температурах 550–700 °С.

4.3.1.2. Алюминиевые бронзы

Алюминиевые бронзы, используемые в качестве подшипниковых сплавов, отличаются большой износостойкостью, но могут вызвать повышенный износ вала. Их применяют вместо оловянных и свинцовых баббитов и свинцовых бронз.

Алюминиевые бронзы по распространенности в промышленности занимают одно из первых мест среди медных сплавов. В меди растворяется довольно большое количество алюминия (рис. 4.6): 7,5 % при 1035 °С; 9,4 % при 565 °С; около 9 % при комнатной температуре. Фаза β представляет соединение Cu_3Al электронного типа с электронной концентрацией 3/2. Эта фаза является аналогом β -латуни и имеет ОЦК-решетку. При температуре 565 °С β -фаза претерпевает эвтектидный распад $\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$, где γ_2 -фаза — электронное соединение Cu_9Al_4 с электронной концентрацией 21/13.

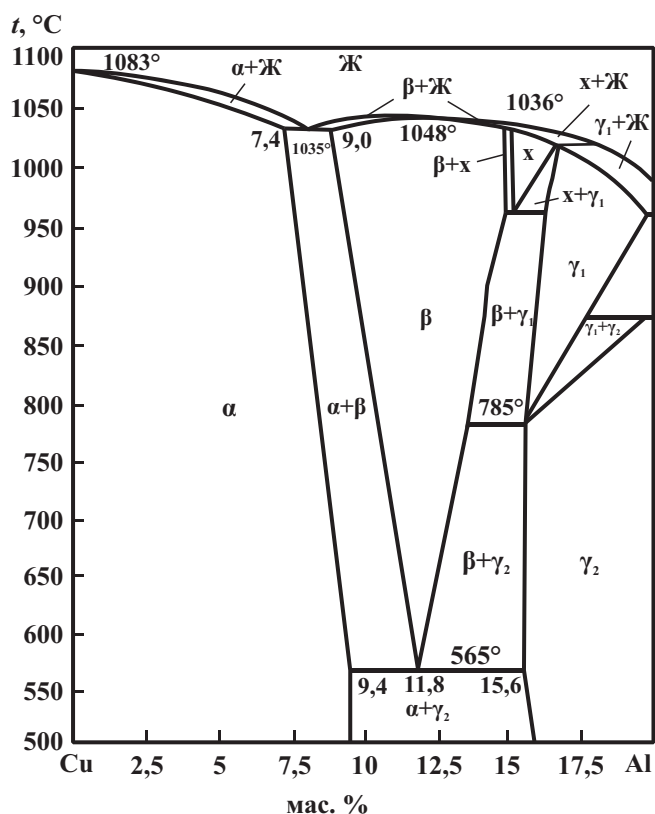


Рис. 4.6. Диаграмма состояния Cu-Al

С увеличением содержания алюминия прочностные свойства сплавов повышаются. Сплавы с α -структурой хорошо обрабатываются давлением как при высоких, так и при низких температурах, но их прочность невелика. Фаза γ_2 имеет очень высокую твердость и ничтожную пластичность: поэтому когда в структуре сплавов появляется γ_2 -фаза, прочность резко возрастает, а пластичность начинает падать.

Из-за ликвационных явлений снижение пластичности, обусловленное γ_2 -фазой, проявляется несколько раньше (обычно начиная с 8 % Al), чем это следует из равновесной диаграммы состояния. Оптимальными механическими свойствами обладают сплавы, содержащие 5–8 % Al. Наряду с повышенной прочностью они сохраняют высокую пластичность.

Алюминиевые бронзы по сравнению с оловянными имеют следующие *преимущества*:

- меньшую склонность к дендритной ликвации;
- большую плотность отливок;
- лучшую жидкотекучесть;
- более высокую прочность и жаропрочность;
- более высокую коррозионную и противокавитационную стойкость;
- меньшую склонность к хладноломкости.

Кроме того, алюминиевые бронзы не дают искр при ударе. В качестве *недостатков* алюминиевых бронз можно отметить следующие особенности:

- значительная усадка при кристаллизации;
- склонность к образованию крупных столбчатых кристаллов;
- сильное окисление в расплавленном состоянии, при котором образуются оксиды алюминия, приводящие к шиферному излому в деформированных полуфабрикатах;
- вспенивание расплава при заливке в форму;
- трудность пайки твердыми и мягкими припоями;
- недостаточная коррозионная стойкость в перегретом паре.

Для устранения этих недостатков алюминиевые бронзы дополнительно легируют марганцем, железом, никелем, свинцом.

В сплавах Cu-Al-Fe со стороны меди растворяется до 4 % Fe. При одновременном легировании алюминиевых бронз никелем и марганцем растворимость железа в α -фазе уменьшается и железистая составляющая появляется при меньших его содержаниях. *Железо* повышает

прочностные свойства алюминиевых бронз при некотором снижении их пластичности, сильно измельчает зерно при кристаллизации и рекристаллизации. При медленном охлаждении в сплавах, содержащих 8–11 % Al, эвтектоидный распад β -фазы приводит к $(\alpha + \gamma_2)$ -структуре с крупными кристаллами γ_2 -фазы, что вызывает хрупкость. Железо замедляет эвтектоидный распад β -фазы и тем самым препятствует развитию хрупкости.

Сплавы меди, легированные *алюминием* и *железом*, наиболее пластичны после нормализации от 600–700 °С, которая уменьшает количество эвтектоида в структуре. После закалки от 950 °С сплавы также отличаются высокой пластичностью, так как их структура представлена α - и β -фазами. Последующее старение при 250–300 °С приводит к распаду β -фазы с образованием высокодисперсной эвтектоидной смеси, что сопровождается повышением прочности и уменьшением пластичности.

Марганец растворяется в алюминиевых бронзах в больших количествах (до 10 %). Он повышает прочность бронз, их пластичность, коррозионную стойкость, антифрикционные свойства, способность к холодной обработке давлением. Двойные сплавы меди с алюминием не обрабатываются давлением в холодном состоянии, если содержание алюминия превышает 7 %. Тройная бронза БрАМн9-2 хорошо обрабатывается давлением как в горячем, так и в холодном состоянии.

Никель сильно уменьшает растворимость алюминия в меди при понижении температуры. Поэтому медные сплавы, одновременно легированные алюминием и никелем, существенно упрочняются при термической обработке, состоящей из закалки и старения, из-за выделения интерметаллидов Ni_3Al и $NiAl$. Никель улучшает механические свойства и коррозионную стойкость алюминиевых бронз, повышает температуру их рекристаллизации и жаропрочные свойства. Сплавы меди, легированные алюминием и никелем, хорошо обрабатываются давлением, имеют высокие антифрикционные свойства и не склонны к хладноломкости.

Небольшие содержания *титана* увеличивают плотность отливок и их прочность. Благоприятное влияние титана на свойства бронз обусловлено его действием как дегазатора, уменьшающего газонасыщенность расплава, и модификатора, измельчающего зерно.

Цинк заметно снижает антифрикционные и технологические свойства алюминиевых бронз и поэтому является нежелательной примесью.

Механические свойства некоторых алюминиевых бронз приведены в табл. 4.3 и 4.4. Одни из них применяют только как литейные (БрАМц10-2; БрАЖН11-6-6; БрАЖС7-1,5-1,5), другие — только как деформируемые (БрА5, БрА7). Большую группу бронз (БрАМц9-2; БрАЖ9-4; БрАЖМц10-3-1,5; БрАЖН10-4-4) используют и как деформируемые, и как литейные сплавы.

Таблица 4.3

**Типичные механические свойства деформируемых безоловянных бронз
и медно-никелевых сплавов (отожженное состояние)**

Название сплавов	Марка сплава	Механические свойства		
		σ_B , МПа	δ , %	KCU , МДж/м ²
Алюминиевые бронзы	БрА5	380	65	1,1
	БрА7	420	70	—
	БрАМц9-2	420	25	—
	БрАЖ9-4	550	40	—
	БрАЖМц10-3-1,5	600	20	0,6
	БрАЖН10-4-4	650	35	0,42
Кремнистые бронзы	БрКМц3-1	400	60	1,5
	БрКН1-3	350	30	—
Марганцевая бронза	БрМц5	300	40	—
Мельхиор	МНЖМц30-1-1	400	25	—
Мельхиор	МН19	400	35	—
Нейзильбер	МНЦ15-20	415	40	—
Нейзильбер свинцовый	МНЦС-16-29-1,8	400	40	—
Куниаль А	МНА13-3	380	13	0,5
Куниаль Б	МНА6-1,5	360	28	1,2

Наиболее пластичная и наименее прочная бронза — БрА5. Она легко деформируется при всех видах обработки давлением. Меньшей, но достаточно высокой обрабатываемостью давлением отличаются бронзы БрА7 и БрАМц9-2, предназначенные для получения прутков, листов и лент. Остальные бронзы (БрАЖ9-4, БрАЖМц10-3-1,5, БрАЖН10-4-4) деформируются только в горячем состоянии, т. к. в их структуре довольно много эвтектоида (до 30—35 %). Вместе с тем благодаря эвтектоиду и железистым включениям антифрикционные свойства и прочность этих бронз выше, чем у перечисленных выше сплавов, поэтому бронзы БрАЖ9-4 и БрАЖМц10-3-1,5 нашли наиболее широкое распространение.

Таблица 4.4

Механические свойства литейных безоловянных бронз (литье в кокиль)

Марка сплава	Механические свойства	
	σ_B , МПа	δ , %
	не менее	
БрА9Мц2Л	390	20
БрА10Мц2Л	490	12
БрА9ЖЗЛ	490	12
БрА10ЖЗМц2	490	12
БрА11Ж6Н6	590	2
БрА10Ж4Н4	590	6
БрА9Ж4Н4Мц	590	12
БрА7Мц15ЖЗН2Ц2*	610	18
БрС30	600	4
БрС60 Н2,5	300	5

*Литье в песчаную форму.

Из всех медно-алюминиевых сплавов наибольшим временным сопротивлением разрыву обладает бронза БрАЖН10–4–4, которую применяют и как деформируемую, и как литейную. Она жаропрочна и сохраняет удовлетворительную прочность до 400–500 °С. При температурах до 250–400 °С у бронзы БрАЖН10–4–4 наименьшая ползучесть в сравнении с другими алюминиевыми бронзами.

Деформируемые полуфабрикаты применяют в состоянии поставки или подвергают дорекристаллизационному или рекристаллизационному отжигу. Дорекристаллизационный отжиг алюминиевых бронз приводит к повышению их упругих свойств. Большинство этих бронз относится к термически неупрочняемым сплавам. Исключение составляет бронза БрАЖН10–4–4, которая эффективно упрочняется закалкой с проведением последующего старения при 400 °С в течение 2 ч.

Повышение износостойкости алюминиевых бронз возможно с помощью способа, включающего отжиг, закалку, отпуск, при этом отжиг проводят нагревая заготовки до 470–510 °С вместе с печью, выдерживая 3–3,5 ч, затем ступенчатый нагрев под закалку, состоящий из нагрева до 880–920 °С и выдержки в течение 2,0–2,5 ч, с последующим охлаждением в масле, отпуск в течение 3–3,5 ч при 300–350 °С. Предлагаемый способ позволяет получить наиболее благоприятное сочетание прочностных и пластических свойств алюминиевых бронз, в результате значительно повысить износостойкость и долговечность.

4.3.1.3. Бериллиевые бронзы

Бериллий с медью образует граничный твердый раствор замещения, при этом растворимость закономерно падает с понижением температуры (рис. 4.7), поэтому бериллиевые бронзы относятся к числу сплавов, термически упрочняемых старением.

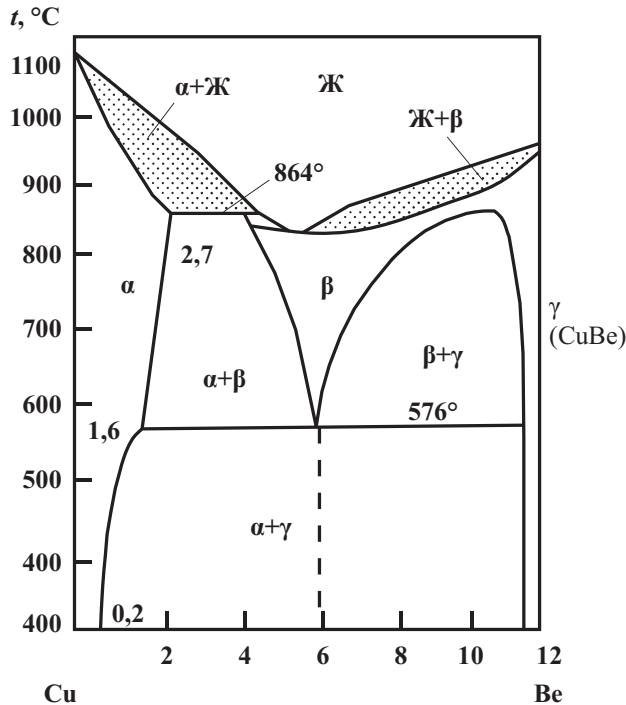


Рис. 4.7. Диаграмма состояния Cu-Be

После закалки от температур, соответствующих α -области, структура бериллиевых бронз представляет собой пересыщенный α -твердый раствор. В закаленном состоянии бериллиевые бронзы отличаются высокой пластичностью и технологичностью, достаточными для холодной обработки давлением.

Распад пересыщенного α -твердого раствора начинается с обогащения плоскости (100) атомами бериллия, в результате чего образуются зоны Гинье — Престона в форме диска, которые затем переходят в когерентные по отношению к матрице тонкие пластинчатые образования промежуточных γ'' - и γ' -фаз, параллельные плоскостям (100) α . Фаза γ' имеет тетрагональную ОЦК-решетку с упорядоченным расположением

ем атомов. По мере развития процесса старения размеры выделений γ' -фазы увеличиваются, а тетрагональность ее решетки уменьшается. На определенной стадии старения при повышенных температурах γ' -фаза теряет когерентность с матрицей, тетрагональность ее решетки приближается к единице, и она превращается в стабильную γ -фазу на основе интерметаллида CuBe. Наибольшее упрочнение при старении обеспечивают выделения γ' -фазы в форме пластинок толщиной 5–10 нм. Оптимальные размеры выделений γ' -фазы формируются в результате старения при 320–340 °С в течение 2–5 ч.

На рис. 4.8 приведена зависимость свойств сплавов Cu-Be от содержания бериллия после закалки с 780 °С и старения при 300 °С в течение 3 ч. Оптимальными свойствами обладают сплавы, содержащие около 2 % Be. При дальнейшем увеличении содержания бериллия прочность сплавов повышается мало, а пластичность становится чрезмерно малой. Как и другие дисперсионно-твердеющие сплавы, бериллиевые бронзы обладают наилучшим комплексом близких к максимальной растворимости свойств при содержании легирующих элементов.

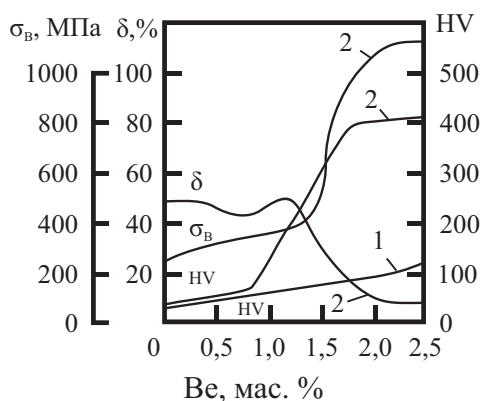


Рис. 4.8. Влияние бериллия на свойства сплавов Cu-Be после закалки от 780 °С (1) и старения при 300 °С, 3 ч (2)

Пересыщенный α -твердый раствор в интервале температур 500–380 °С распадается очень быстро. Поэтому скорость охлаждения бериллиевых бронз при закалке должна быть достаточно большой (обычно их закалывают в воду). Нерезкое охлаждение в интервале температур 500–380 °С приводит к частичному прерывистому распаду пересыщен-

ного раствора с образованием пластинчатых перлитообразных структур. Прерывистый распад нежелателен по двум причинам:

- сплавы охрупчиваются из-за локализации прерывистого распада по границам зерен;
- при последующем старении уменьшается упрочнение, обусловленное непрерывным распадом пересыщенного раствора, а эффект упрочнения от прерывистого распада меньше, чем от непрерывного.

Бериллиевые бронзы дополнительно легируют *никелем* и *титаном*. Никель образует малорастворимый бериллид никеля NiBe и уменьшает растворимость бериллия в меди. Он замедляет фазовые превращения в бериллиевых бронзах и облегчает их термическую обработку, т. к. отпадает необходимость в крайне высоких скоростях охлаждения. Никель задерживает рекристаллизационные процессы в сплавах Cu-Be , способствует получению более мелкого рекристаллизованного зерна, повышает жаропрочность. Титан образует соединения TiBe_2 и Cu_3Ti , которые обеспечивают дополнительное упрочнение.

Бериллиевые бронзы отличаются высоким сопротивлением малым пластическим деформациям из-за сильного торможения дислокаций дисперсными частицами. С увеличением этого сопротивления уменьшаются обратимые и необратимые микропластические деформации при данном приложенном напряжении и, следовательно, релаксация напряжений. Все это приводит к повышению релаксационной стойкости сплавов — основной характеристики, которая определяет свойства упругих элементов.

Наибольшее распространение получили бронзы БрБ2, БрБНТ1,7 и БрБНТ1,9 (табл. 4.5). После упрочняющей термической обработки они характеризуются высокими прочностными и пружинящими свойствами, а также удовлетворительным сопротивлением ползучести и хорошей коррозионной стойкостью. Они обладают отличной износостойкостью, сохраняют высокую электро- и теплопроводность. Эти сплавы имеют низкую склонность к хладноломкости и могут работать в интервале температур от -200 до $+250$ °С.

Сплавы меди с бериллием отличаются уникально благоприятным сочетанием в них высоких прочностных и упругих свойств, высокой электро- и теплопроводности, высокого сопротивления разрушению и коррозионной стойкости. Пружина из бериллиевой бронзы выдерживает 20 млн сжатий, а стальная пружина выходит из строя по-

сле 1 млн сжатий. Применяют ее, в частности, в часовой промышленности.

Таблица 4.5

Механические свойства бериллиевых бронз

Марка бронзы	Закалка		Закалка и старение по оптимальному режиму		
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
БрБНТ1,9	400–500	38–45	1150–1250	700	1–6
БрБ2	400–500	38–40	1150–1250	600	1–6
БрБ2,5	400–500	—	—	650	—
БрБНТ1,7	300–400	45–50	1000–1100	400	3–7

Бериллиевую бронзу используют в подшипниках для самолетных шасси, для подводных океанических телефонных кабелей, в качестве изложниц для тонкого прецизионного литья при изготовлении пластмассовой мебели, в авиационных скорострельных пулеметах, в автомобилях и т. д.

4.3.1.4. Кремнистые бронзы

Кремний растворяется в меди в довольно больших количествах: 5,3 % при 842 °С; 4,65 % при 356 °С; около 3,5 % при комнатной температуре. Поскольку вторая фаза γ сильно уменьшает технологичность сплавов системы Cu-Si, то в кремнистые бронзы вводят не более 3 % Si. При увеличении содержания кремния до 3,5 % повышается не только временное сопротивление разрыву меди, но и относительное удлинение.

Двойные сплавы системы Cu-Si не применяют; их дополнительно легируют никелем и марганцем, которые улучшают механические и коррозионные свойства кремнистых бронз. При введении в сплавы меди, содержащие до 3 % Si, менее 1,5 % Mn упрочнение обусловлено только растворным механизмом.

Кремнистые бронзы отличаются высокими пружинящими и антифрикционными свойствами, хорошей коррозионной стойкостью. Они отлично обрабатываются давлением как в горячем, так и в холодном состоянии. Эти сплавы хорошо свариваются с бронзой и сталью, легко паяются мягкими и твердыми припоями. Кремнистые бронзы не дают искр при ударе, обладают довольно высокой жидкотекучестью. Недостатком этих сплавов является большая склонность к поглощению газов.

В промышленном масштабе применяют бронзы БрКМц3-1, БрКН1-3 и БрКН0,5-2 (см. табл. 4.3). Бронза БрКМц3-1 имеет однофазную структуру и отличается высокими технологическими, механическими, пружинящими и коррозионными свойствами. Эту бронзу применяют как деформируемую. Бронзы БрКН1-3 и БрКН0,5-2 термически упрочняются; после закалки от 850 °С временное сопротивление разрыву бронзы БрКН1-3 составляет около 350 МПа при относительном удлинении 30 %, а после старения при 450 °С в течение 1ч — 700 МПа при относительном удлинении 8 %.

4.3.1.5. Свинцовые бронзы

Свинцовые бронзы обладают наилучшими антифрикционными свойствами в сравнении с другими сплавами на основе меди и поэтому наиболее широко применяются для изготовления подшипников скольжения. Наличие свинца в бронзах, предназначенных для изготовления деталей, работающих на трение, резко повышает их антифрикционные свойства. Свинец облегчает прирабатываемость детали в начальный период ее работы. Лучшая в сравнении с другими бронзами способность удерживать смазку на трущихся поверхностях является дополнительным фактором, повышающим износостойкость свинцовых бронз. Антифрикционные свойства свинцовых бронз определяются количеством содержащего в них свинца и равномерностью его распределения по трущейся поверхности детали.

Классическую структуру подшипникового материала имеет бронза БрСН60-2,5 (рис. 4.9). Мягкая (темная фаза) составляющая представлена свинцом, а твердая — медью (светлая фаза). Мягкая свинцовистая составляющая образует в металле буферный слой между шейкой вала и более твердыми первичными кристаллами меди (или кристаллическим скелетом).

Шейка вала сильнее истирает соприкасающуюся с ней мягкую свинцовистую составляющую, чем более твердые первичные кристаллы или дендритный скелет. Выступающие твердые кристаллы принимают на себя давление вала и толчки, неизбежные при работе подшипника, и постепенно вдавливаются в свинцовистую составляющую. Свинцовистая составляющая вновь вступает в контакт с вращающейся шейкой вала, давление на твердые кристаллы в итоге понижается. Вступившая в контакт мягкая составляющая начинает истираться, и вновь выступают твердые кристаллы. Этот процесс повторяется

многократно, и кольцевой зазор между шейкой вала и подшипником постепенно заполняется массой, состоящей из мелкодисперсных частиц и смазки.

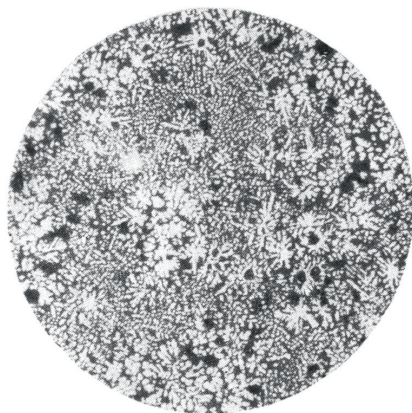


Рис. 4.9. Микроструктура бронзы БрСН60-2,5; $\times 100$

Из-за большого интервала кристаллизации, малой вязкости расплава и значительной разницы в плотности меди и свинца ($8,94$ и $11,34 \text{ г/см}^3$ соответственно) свинцовые бронзы очень склонны к ликвации по удельному весу. Для борьбы с ликвацией применяют большие скорости охлаждения или вводят дополнительные легирующие элементы. Никель в этой бронзе способствует образованию тонко разветвленных дендритов из первичных кристаллов меди, которые затрудняют ликвацию меди и свинца по плотности. Для широко распространенной двойной свинцовой бронзы БрС30 не характерна классическая структура подшипника. Свинец не образует в ней пластичной матрицы, а присутствует в виде включений внутри меди. Тем не менее эта бронза обладает высокими антифрикционными свойствами, так как медь сама достаточно пластична, чтобы обеспечивать хорошую прирабатываемость. В сравнении с оловянными подшипниковыми бронзами теплопроводность свинцовых бронз в четыре раза больше, благодаря чему они хорошо отводят тепло, возникающее при трении. Прочность и твердость свинцовых бронз сравнительно невысока (см. табл. 4.4), поэтому их наплавляют на стальные трубы или ленты.

4.3.1.6. Применение бронз как антифрикционного материала

Бронзы очень широко используются в качестве антифрикционных материалов в машиностроении. К числу таких бронз относится боль-

шинство оловянных (кроме БрОЦ4-3) бронз, а из безоловянных — БрАМц, БрАЖ, БрАЖМц, БрАЖН. Данные бронзы применяются главным образом для изготовления:

- опор подшипников скольжения;
- колес (венцов) червячных передач;
- гаек в передачах «винт-гайка».

Антифрикционные свойства составляют отдельную группу свойств и не связаны напрямую с их механическими свойствами. Антифрикционные свойства определяются свойствами поверхностного слоя, тогда как механические свойства определяются объемными свойствами материала.

Данное утверждение можно проиллюстрировать при сравнении двух бронз — БрС30 и БрАЖ9-4 — при их использовании в подшипниках скольжения. БрС30 существенно уступает бронзе БрАЖ9-4 по всем механическим показателям (прочность, твердость, относительное удлинение). Однако именно она применяется в особо ответственных подшипниках, допускающих высокие скорости и высокие нагрузки (в т. ч. ударные). Поэтому при выборе бронзы для использования в узлах трения учитывают прежде всего антифрикционные, а затем механические свойства. Для этих целей массово используются круги и полые заготовки БрАЖ9-4 и БрАЖМц10-3-1.5, БрОЦС5-5-5, БрОФ10-1. Для направляющих используются катаные полосы из БрАМц9-2 и плиты (литые и отфрезерованные) из БрАЖ9-4 и БрОЦС5-5-5.

Критерии выбора той или иной марки бронзы зависят от вида узла трения и условий его работы. Для наиболее распространенных случаев можно пользоваться следующими общими рекомендациями:

1. *Подшипники скольжения.* При скоростях скольжения более 5–6 м/с предпочтительно применять БрОФ10-1. При скоростях менее 5–6 м/с можно применять БрАЖ9-4 или БрОЦС5-5-5. Если опорная поверхность вала закалена, то можно применять любую из этих бронз, но БрАЖ допускает вдвое большие радиальные нагрузки. Если опорная поверхность вала не закалена, можно применять только БрОЦС.

2. *Колеса (венцы) червячных передач.* При скоростях скольжения более 8–12 м/с применяется БрОФ10-1. При скоростях 4–10 м/с применяется БрОЦС5-5-5. При скоростях менее 4–6 м/с применяется БрАЖ9-4.

Для втулок подшипников, работающих в агрессивных средах, большое распространение получили алюминиевые бронзы БрАЖ9-4, БрАЖН10-4-4 и БрАЖМц10-3-1, которые в ряде случаев являются заме-

нителями оловянных бронз. Они имеют высокую коррозионную стойкость в атмосферных условиях, морской воде, большинстве органических кислот, растворах сернокислых солей, едких щелочей и других средах, кроме концентрированных кислот. Алюминиевые бронзы, содержащие железо, отличаются высокой прочностью и износостойкостью, но могут вызвать повышенный износ шипа, если твердость его не выше твердости вкладыша. Свинцовистые бронзы в особенности ценны тем, что имеют большую ударную вязкость, вкладыши из этих бронз выдерживают значительные знакопеременные и ударные нагрузки.

Проведенные исследования износостойкости бронз в паре со сталью в среде глицерина показывают, что в зависимости от условий испытания износ бронзы может быть большим и ничтожно малым. В том случае, если поверхность трения бронзы при установившемся режиме покрывается тонким слоем меди, дальнейшее анодное растворение прекращается, происходит пассивация, что приводит к резкому уменьшению износа. Если же бронза содержит много легирующих элементов, легко растворимых в глицерине (например, бронза БрАЖМц), и условия работы тяжелые (высокие удельные нагрузки), то процесс растворения идет интенсивно, выделившаяся медь хотя и схватывается со сталью, но из-за атомарного состава твердых растворов образует аморфный рыхлый слой, который не успевает кристаллизоваться. Износостойкость бронзы при таких условиях мала. С уменьшением удельного давления скорость растворения падает, на бронзе образуется пассивирующая пленка, что снижает интенсивность износа. В таких условиях применение бронзы БрАЖМц повышает долговечность узлов.

Износостойкость хромистой и хромоциркониевой бронзы мало отличаются друг от друга при температурах 300–700 °С. Эта бронза мало изнашивается и обладает способностью образовывать на поверхности трения слой пленки черного цвета, причем высокая способность пленкообразования сказывается при высоких температурах.

Фосфор (до 0,3 %) улучшает литейные свойства, а при увеличении его содержания до 1 % повышаются твердость и износостойкость бронз.

При испытаниях с повышенной температурой в среде глицерина увеличение износа бронзы БрОФ с увеличением температуры происходит значительно медленнее, чем бронзы БрАЖМц. Дело в том, что при одних и тех же номинальных площадях трения образцов бронз БрОФ и БрАЖМц и одних и тех же номинальных нагрузках на образце бронзы БрОФ увеличение площади фактического контакта при трении про-

исходит во много раз медленнее, чем на образце БрАЖМц, в результате чего на первом образце фактические удельные нагрузки во много раз превышают номинальные, а фактические удельные давления при трении на втором— значительно меньше. При трении бронзы БрОФ по нержавеющей стали (при полном отсутствии пленки меди) отмечалось лишь небольшое ускорение растворения.

Кроме гостированных применяют нестандартные марки бронз, а также марки, предусматривавшиеся ранее действовавшими ГОСТами. Наиболее распространены для изготовления автомобильных деталей оловянистые бронзы. Они характеризуются достаточной прочностью, высокими антифрикционными качествами, коррозионной стойкостью, хорошей теплопроводностью. Деформируемые оловянистые бронзы отличаются, кроме того, хорошими упругими свойствами. Повышение содержания олова в оловянистых бронзах увеличивает их прочность и твердость, но уменьшает пластичность и ударную вязкость.

В качестве легирующих присадок в оловянистую бронзу вводят фосфор, свинец, цинк, никель. Цинк и никель повышают механические свойства бронзы, причем никель способствует измельчению зерна и улучшению структуры сплава, свинец и фосфор улучшают антифрикционные свойства, а также обрабатываемость резанием (свинец) и износостойкость (фосфор). Вместе с тем наличие фосфора в количестве более 0,2–0,3 % и свинца снижает механические свойства сплава. С увеличением содержания цинка облегчается сварка и пайка бронзы. Из специальных бронз наибольшее применение в автомобилестроении и авторемонтном производстве нашли свинцовистые бронзы, отличающиеся высокой износостойкостью и повышенной по отношению к другим антифрикционным сплавам температурной стойкостью. Свинцовистые бронзы применяют для заливки вкладышей подшипников коленчатых валов автомобильных и тракторных дизельных двигателей. *Свинцовые бронзы* в качестве подшипниковых сплавов могут работать в условиях ударной нагрузки.

4.3.2. Латунь

Латунь (ГОСТ 15527–2004) — сплавы меди, в которых главным легирующим элементом является цинк (до 45 %). Различают двойные и многокомпонентные (специальные) латуни, содержащие дополни-

тельные (легирующие) элементы. Двойные латуни маркируют буквой Л и числами, характеризующими среднее содержание легирующих элементов. Так, латунь Л80 содержит 80 % Cu и соответственно 20 % Zn. Если латунь легирована помимо цинка другими элементами, после буквы Л ставят условное обозначение этих элементов: С — свинец, О — олово, Ж — железо, А — алюминий, К — кремний, Мц — марганец, Н — никель. Цифры после букв указывают среднее содержание каждого легирующего элемента в латуни, кроме цинка. Содержание цинка определяется по разности до 100 %. Так, в латуни ЛАН-59-3-2 содержится 59 % Cu, 3 % Al, 2 % Ni и 36 % Zn. В марке литейной латуни указывают не содержание меди, а содержание цинка, причем содержание легирующих элементов указывают не в конце марки, а после буквы, обозначающей элемент.

Латуни имеют широкое распространение благодаря сочетанию высоких механических и технологических свойств, в том числе в качестве антифрикционных сплавов. *Латуни* по антифрикционным свойствам уступают бронзам. Их используют для подшипников, работающих при малых скоростях и умеренных нагрузках.

4.3.2.1. Двойные латуни

Фазовое состояние латуней описывается диаграммой состояния системы медь—цинк (рис. 4.10). Структура латуней состоит из α - или $\alpha + \beta'$ -фаз, где α -фаза — твердый раствор замещения цинка в меди, имеющий решетку ГЦК, высокую пластичность, низкие значения прочности и твердости; β' -фаза — упорядоченный твердый раствор на базе интерметаллида CuZn (относящегося к группе электронных соединений) с кристаллической решеткой ОЦК. Эта фаза характеризуется более высокой твердостью, чем α -фаза, и хрупкостью. При нагреве в интервале 451–468 °С нарушается упорядоченное расположение атомов в ОЦК-решетке (β' -фазы), и она обозначается как β -фаза. Нарушение упорядоченности повышает пластичность β -фазы.

По структуре сплавы системы Cu-Zn разделяют на α - (до 39 % Zn); ($\alpha + \beta$)- и β -латуни; упорядочение β -фазы в этой классификации не учитывается. Структура однофазной (α) и двухфазной ($\alpha + \beta$)-латуней приведена на рис. 4.11. Однофазная латунь в отожженном состоянии имеет характерное строение в виде полиэдрических зерен с многочисленными двойниками отжига (рис. 4.11, а). Структура двухфазной латуни представляет собой ясно выраженную смесь кристаллов α - и β -фаз (рис. 4.11, б).

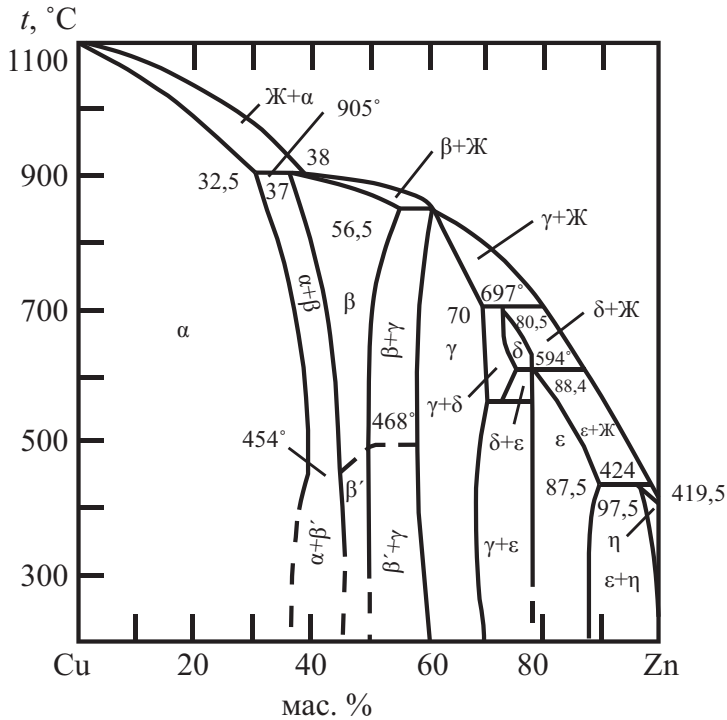
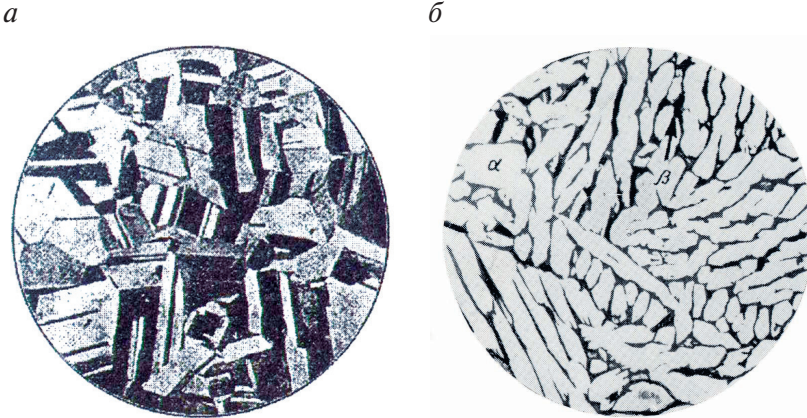


Рис. 4.10. Диаграмма состояния системы Cu-Zn

Рис. 4.11. Структура однофазной (а) и двухфазной (б) латуней; $\times 200$

С увеличением содержания цинка прочность возрастает (рис. 4.12). Поперечное сужение снижается, особенно резко при переходе от α -к ($\alpha + \beta$)-структуре. Относительное удлинение достигает максималь-

ного значения при 30–32 % Zn (до 58 %), а затем резко уменьшается, особенно при наличии β' -фазы. Временное сопротивление разрыву возрастает до 47–50 % Zn. Однако как только β' -фаза полностью сменяет α -фазу, оно резко снижается. Пониженная пластичность β' -фазы обусловлена упорядоченным расположением атомов. Когда при нагреве β' -фаза переходит в неупорядоченную β -фазу, ее пластичность резко возрастает и она становится пластичнее α -фазы.

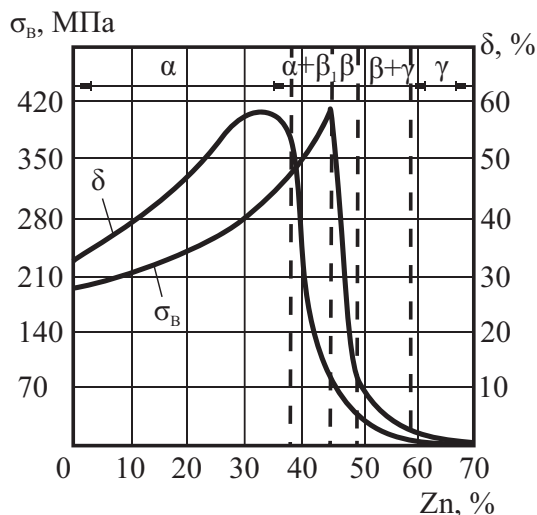


Рис. 4.12. Влияние цинка на механические свойства меди

Латуни со структурой α -фазы пластичны, имеют высокую технологичность и легко поддаются горячей и холодной обработке давлением. В температурном интервале 300–700 °С α -латуни, как и медь, обнаруживают провал пластичности, и этого интервала температур при обработке давлением надо избегать. Пластичность β -латуней при комнатной температуре очень мала, и при содержании около 50 % Zn и более они не поддаются холодной обработке давлением, поэтому в промышленном масштабе применяют лишь α - и $(\alpha+\beta)$ -латуни. Однако β -латуни представляют интерес как основа сплавов с памятью формы и материалов с высоким пределом упругости («сверхупругостью»).

Латуни обладают хорошими литейными качествами (малой склонностью к ликвации, хорошей жидкотекучестью и др.), способностью к пластической деформации, поэтому их выпускают преимущественно в катаном состоянии (листы, ленты, профили и т. д.) — это дефор-

мируемые сплавы. Причем α -латуни подвергают холодной пластической деформации при комнатной температуре, т. к. в интервале температур 300–700 °С они становятся менее пластичными. Способность α -латуней к горячей пластической деформации уменьшается из-за примесей висмута и свинца, образующих легкоплавкие эвтектики по границам зерен. И наоборот, $\alpha+\beta$ -латуни подвергают горячей пластической деформации, т. к. при нагреве выше температуры 500 °С они становятся более пластичными. В $\alpha+\beta$ -латуни примесь свинца не оказывает влияния при горячей обработке давлением, т. к. свинец, располагающийся по границам зерен, при нагреве в результате перекристаллизации $\alpha\rightarrow\beta$ оказывается внутри них. Поэтому в $\alpha+\beta$ -латуни вводят до 1–2 % свинца для улучшения обрабатываемости резанием. Например, выпускают автоматную латунь ЛС59.

Наличие 1–1,5 % олова в латуни повышает ее коррозионную стойкость в морской воде. В латуни можно вводить также алюминий и никель для повышения механических свойств и коррозионной стойкости (ЛАН5 9-3-2, где буква А и цифра 3 обозначают наличие алюминия в количестве 3 %, а буква Н и цифра 2 — наличие никеля 2 %). На наличие марганца в латуни указывают буквы Мц в обозначении ее марки, кремния — буква К, железа — буква Ж и так далее с указанием процентного содержания их соответственно расположению букв в марке. Например, в прутке латуни марки ЛЖМц59-1-1 содержится меди в среднем 59 %, железа 1 % и марганца 1 %. При использовании латуни как литейного сплава в обозначение марки вводят дополнительно букву Л после цифр, указывающих количественное содержание элементов (ЛС59-1Л).

Наиболее широко применяют двойные латуни марок Л90, Л68, Л63 (табл. 4.6). Латунь Л90 называют *томпаком*; она обладает высокой стойкостью против коррозии и имеет красивый золотистый цвет, в связи с чем ее применяют для изготовления знаков отличия и фурнитуры. Латунь Л68 называют патронной, из нее изготавливают изделия холодной штамповкой и глубокой вытяжкой, в частности гильзы патронов. Латунь Л63 называют торговой, так как она среди всех латуней занимает первое место по объему производства.

Отрицательное свойство латуней заключается в их склонности к самопроизвольному коррозионному растрескиванию, которое происходит во влажной атмосфере при сохранении в сплаве после деформации остаточных напряжений. Развитию растрескивания спо-

способствует присутствию в атмосфере следов аммиака, аммонийных солей, сернистых газов. Данное явление называют еще *сезонной болезнью*, т. к. оно чаще всего происходит весной и осенью, когда влажность воздуха повышена.

Таблица 4.6

Механические свойства отожженных деформируемых латуней

Марка латуни	Структура	Механические свойства	
		σ_B , МПа	δ , %
Л96	α	216–255	45–55
Л90	α	230–340	≥ 36
Л80	α	260–370	≥ 40
Л68	α	290–390	≥ 42
Л63	α	290–400	≥ 38
Л60	$\alpha + \beta$	360–410	40–50
ЛА77-2	α	340–440	42–52
ЛАН59-3-2	$\alpha + \beta$	440–540	40–50
ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-,05	α	540	48
ЛК80-3	$\alpha + \beta$	275–335	53–60
ЛН65-5	α	370–440	45–65
ЛМц58-2	$\alpha + \beta$	380–490	≥ 30
ЛЖМц59-1-1	$\alpha + \beta$	430	28
ЛМцА57-3-1	$\alpha + \beta$	390–490	40–50
ЛО90-1	α	245–304	42–50
ЛО70-1	α	311–370	55–65
ЛО62-1	α	390	≥ 5
ЛС74-3	α	295–390	40–55
ЛС63-3	α	300	25
ЛС60-1	$\alpha + \beta$	340–390	45–55
ЛС59-1	$\alpha + \beta$	340–490	≥ 25

Растрескивание происходит из-за предпочтительной коррозии латуни по границам зерен в зоне неравномерного распределения напряжений. Это явление усиливается с увеличением содержания цинка и развивается особенно интенсивно при содержаниях его более 30 %. Для устранения склонности к растрескиванию нужно отжечь деформированные полуфабрикаты при температурах ниже температуры рекристаллизации. При таком отжиге эффективно снимаются остаточные напряжения и сохраняется высокая прочность, обусловленная наклепом.

4.3.2.2. Многокомпонентные (легированные) латуни

Для улучшения свойств латуни дополнительно легируют алюминии-ем, марганцем, железом, никелем, оловом, свинцом, кремнием, кото-рые вводят в небольших количествах (обычно 1–2 %, в редких случаях до 4 %). Специальные латуни называют по основному дополнитель-ному элементу: алюминиевые, кремниевые, марганцевые, никелевые, оловянные, свинцовые.

Введение в латуни каждого нового элемента, кроме никеля, уменьша-ет растворимость цинка в меди и способствует появлению и увеличению количества β -фазы. При содержании легирующих элементов в количе-ствах, больших предельной их растворимости в α - и β -фазах, в структуре латуней появляются новые фазы. Железо и свинец практически нерас-творимы в меди и в латунях и присутствуют в них в свободном виде. Только никель увеличивает растворимость цинка в меди. При введении никеля в ($\alpha + \beta$)-латуни количество β -фазы уменьшается и при доста-точном его содержании исчезает совсем; сплав становится α -латунью.

Комплексное легирование специальных латуней позволяет по-лучить более высокие по сравнению с двойными сплавами системы Cu-Zn механические свойства, лучшую коррозионную и кавитацион-ную стойкость. Удастся сохранить достаточно хорошую обрабатывае-мость давлением при высоких температурах и несколько меньшую — при низких.

Временное сопротивление разрыву латуней наиболее эффектив-но повышают *алюминий* и *олово* и в меньшей степени *марганец*. Введе-ние *свинца* приводит к снижению прочности латуней. Относительное удлинение латуней увеличивается при введении *железа* и небольших количеств *марганца* (до 2–3 %), остальные элементы уменьшают от-носительное удлинение латуней.

Частицы железа увеличивают скорость образования центров при кристаллизации и рекристаллизации, тормозят последующий рост зерен и поэтому способствуют измельчению структуры. Уменьшение размеров зерна при легировании латуней железом является причиной повышения относительного удлинения латуней, содержащих железо.

Алюминий, марганец, олово и никель повышают коррозионную стой-кость латуней; никель, кроме того, уменьшает склонность латуней к коррозионному растрескиванию. Благоприятное действие этих эле-ментов на коррозионную стойкость связано с образованием на поверх-ности латуней плотной оксидной защитной пленки.

В промышленном масштабе применяют *деформируемые и литейные латуни*. Механические свойства некоторых деформируемых латуней приведены в табл. 4.6.

4.3.2.3. Деформируемые латуни

Наибольшее распространение получили богатые медью α -латуни, содержащие до 4 % Al (ЛА85-0,5; ЛА77-2), которые вследствие однофазной структуры хорошо обрабатываются давлением, однако эта структура неблагоприятна для использования в антифрикционных сплавах.

Для *никелевой* латуни ЛН65-5 характерны высокие технологические свойства, она отлично обрабатывается в горячем и холодном состоянии.

Марганцевая латунь ЛЖМц59-1-1 обладает высокой прочностью и повышенной вязкостью вследствие мелкозернистой структуры, обусловленной легированием сплава железом. *Оловянные* латуни отличаются высокой коррозионной стойкостью в морской воде, поэтому их называют морскими латунями. *Алюминиевая* α -латунь ЛАМш77-2-0,05 благодаря микролегированию мышьяком хорошо сопротивляется обесцинкованию в морской воде.

Свинцовые латуни хорошо обрабатываются резанием. Они являются наилучшим материалом для деталей, вытачиваемых на станках-автоматах. В отличие от α -латуней, свинец в $(\alpha+\beta)$ -латунях не является вредной примесью, т. к. в результате превращения $\beta \rightarrow \alpha$ в процессе охлаждения он располагается не по границам зерен, а внутри кристаллов α -фазы, образующихся на включениях свинца как на зародышах. Свинец делает стружку ломкой, что облегчает обрабатываемость резанием. В то же время свинец повышает антифрикционные свойства.

Латунь ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5 — это единственный дисперсионно-твердеющий сплав на основе системы Cu-Zn. Дисперсионное упрочнение обеспечивают соединения на основе кремния, никеля и марганца, обладающие в меди переменной растворимостью. В закаленном состоянии латунь данного состава отличается повышенной пластичностью (механические свойства: $\sigma_b = 540$ МПа, $\sigma_{0,2} = 224$ МПа, $\delta = 48\%$, $\psi = 61\%$), а после старения приобретает высокую прочность ($\sigma_b = 700$ МПа, $\sigma_{0,2} = 466$ МПа; $\delta = 25\%$; $\psi = 41\%$). Прочностные свойства латуней можно существенно повысить путем пластической деформации. Временное сопротивление разрыву латуней при наклепе

увеличивается на 250—300 МПа. Вместе с тем наклеп большинства латуней, как простых, так и специальных, обуславливает развитие в них самопроизвольного растрескивания.

Основной вид термической обработки латуней — *отжиг*, который проводят для смягчения материала перед дальнейшей обработкой давлением, получения в готовых полуфабрикатах нужных свойств, а также для устранения склонности к сезонному растрескиванию. Однофазные α -латуни подвергают рекристаллизационному отжигу. Температура рекристаллизации α -латуней выше, чем у меди, поскольку все легирующие элементы данную температуру повышают. В промышленных условиях отжиг латуней проводят при 600—700 °С.

4.3.2.4. Литейные латуни

Литейные латуни широко применяют в технике, что объясняется следующими причинами:

- латуни обладают небольшой склонностью к газонасыщению благодаря самозащитному действию паров цинка с достаточно высокой упругостью, что обеспечивает получение плотного литья;
- латуни мало склонны к ликвационным явлениям, т. к. линии ликвидуса и солидуса очень близки;
- благодаря малому интервалу кристаллизации латуни обладают хорошей жидкотекучестью и небольшой усадочной рассеянной пористостью;
- специальные литейные латуни отличаются высокими механическими свойствами;
- поверхность специальных латуней после обработки резанием, шлифовки и полировки приобретает красивый цвет и блеск;
- многие литейные латуни обладают высокими антифрикционными свойствами.

Вместе с тем литейные латуни имеют и недостатки, среди которых следует отметить следующие:

- при плавке теряется большое количество цинка из-за большой его летучести, для устранения этого недостатка приходится применять защитные покрытия;
- при кристаллизации в отливках образуются крупные усадочные раковины, для выведения которых приходится применять большие прибыли и переводить довольно много металла в отходы;

- литейные латуни с большим количеством β -фазы склонны к сезонному саморастрескиванию при наличии остаточных напряжений. Для устранения данного недостатка отливки надо отжигать при низких температурах.

Состав и свойства некоторых литейных латуней приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Механические и литейные свойства специальных литейных латуней

Марка латуни	Механические свойства при литье в кокиль			Литейные свойства	
	σ_B , МПа	δ , %	КСУ, МДж/м ²	жидкотекучесть, см	линейная усадка, %
ЛЦ30А3	390	15	—	—	—
ЛЦ23А6ЖЗМц2	710	7	—	—	—
ЛЦ16К4	340	15	1,2	80	1,7
ЛЦ38Мц2С2	340	10	0,7	—	1,8
ЛЦ40Мц3Ж	490	10	—	60	1,6
ЛЦ40С	215	20	0,26	51	2,2
Л40Мц1,5	370	20	—	—	—
ЛЦ40Мц3А	440	15	—	—	—

Литейные латуни маркируют так же, как деформируемые; если их составы одинаковы, то при применении латуни для фасонного литья к марке добавляют букву Л.

В литейных латунях допускается больше примесей, чем в деформируемых, по следующим причинам:

- при фасонном литье нет необходимости обеспечивать высокую деформируемость;
- многие литейные латуни готовят из лома и отходов.

Наиболее прочной литейной латунью является ЛЦ23А6ЖЗМц2 с кажущимся содержанием цинка 46,5 %, что соответствует почти однофазной β -структуре. Высокому комплексу механических свойств этой латуни способствует ее легирование железом, которое сильно измельчает зерно β -фазы при кристаллизации.

4.3.2.5. Специальные медные сплавы

Благодаря высокой электропроводности медь — незаменимый материал в электротехнике вследствие того, что в ряде областей спе-

циальной техники (электромашиностроение, приборостроение) к электротехническим материалам добавляется требование хороших антифрикционных свойств. Основной недостаток меди — относительно малую прочность — преодолевают наклепом, легированием, термической и термомеханической обработкой.

С помощью холодной деформации можно практически удвоить прочностные характеристики меди; электросопротивление при этом возрастает всего на 3 %. Однако наклеп можно использовать для упрочнения меди лишь в условиях работы при относительно невысоких температурах, т. к. выше примерно 200 °С начинается рекристаллизация.

Для применения в электротехнике медь можно легировать лишь элементами, которые значительно повышают прочность без существенного снижения электропроводности. Из сопоставления данных о влиянии легирующих элементов на прочностные характеристики и электропроводность меди следует, что целесообразно легировать проводниковые сплавы серебром, кадмием, хромом, цирконием и магнием. Так, при введении в медь 1 % Zr или Cr твердость повышается в 2,5 раза, а электропроводность уменьшается всего на 20–30 %. Наилучшее сочетание прочности и электропроводности достигается при легировании меди не одним, а двумя или тремя элементами, причем содержание этих элементов можно подобрать таким образом, что снижение электропроводности при совместном легировании будет меньше, чем при введении одного компонента в том же количестве, что и в многокомпонентном сплаве.

Бронзы высокой электропроводности по типу упрочнения разбивают на две группы:

- сплавы, упрочняемые холодной деформацией;
- термически упрочняемые сплавы.

К первой группе принадлежат сплавы систем Cu-Ag, Cu-Cd и Cu-Mg. Бронза БрСр, содержащая 0,07–0,12 % Ag, однофазна, т. к. серебро растворяется в меди в больших количествах. Высокой прочностью и электропроводностью отличается кадмиевая бронза, содержащая 0,9–1,20 % Cd. Растворимость кадмия в меди составляет 3 % при 549 °С и уменьшается до 0,5 % при комнатной температуре. Однако упрочнение кадмиевой бронзы выделениями β -фазы (CdCu_2) незначительно. Кадмиевая бронза характеризуется способностью к искрогашению и поэтому применяется для изготовления контактных проводов

электрифицированного транспорта, коллекторных шин, электродов сварочных машин, разрывных контактов и подобных изделий.

Растворимость магния в меди уменьшается от 2,8 % при эвтектической температуре (722 °С) до 1,2 % при 400 °С. Выделяющаяся при распаде твердого раствора фаза Cu_2Mg сильно ухудшает деформируемость сплавов при холодной обработке и исключает возможность эффективного наклепа. Поэтому магниевые бронзы содержат до 1 % Mg. Магниевую бронзу БрМг0,3 рекомендуют как заменитель кадмиевой бронзы в производстве контактных колец и коллекторных пластин. Бронзы БрМг0,5 и БрМг0,8 применяют для изготовления кабелей и троллейных проводов.

Хромовые бронзы, содержащие обычно от 0,4 до 1,0 % Cr, обладают высокой электропроводностью после закалки и старения. Хром мало растворим в меди: 0,65 % Cr при 1072 °С и 0,02 % Cr при 400 °С, поэтому после старения структура хромовых бронз представлена почти чистой медью и небольшим количеством выделений хрома. При такой структуре сохраняется высокая электропроводность, составляющая около 80 % от электропроводности меди. Хромовые бронзы имеют высокое сопротивление ползучести, хорошо сопротивляются износу. Они широко применяются для изготовления электродов аппаратов контактной сварки и коллекторов электромоторов.

Хорошими свойствами обладают сплавы, легированные 0,10–0,8 % циркония. Еще более высоким сочетанием свойств отличаются бронзы, одновременно легированные и хромом, и цирконием. Введение сотых долей процента циркония в сплавы меди с 0,1–1,0 % хрома приводит к существенному повышению температуры рекристаллизации, прочности и жаропрочности. Находящийся в твердом растворе цирконий уменьшает диффузионную подвижность хрома, что и обуславливает высокую жаропрочность сплавов Cu-Cr-Zr. Благодаря высокой тепло- и электропроводности в сочетании с высокой жаропрочностью хромоциркониевая бронза БрХЦр (табл. 4.8) — это наиболее распространенный материал для электродов контактной сварки.

К сплавам с интерметаллидным упрочнением относятся бронзы БрНБТ, БрКБ, БрКХКо и БрНКХ. У этих бронз самые высокие прочностные характеристики, но вместе с тем и в 1,5–2 раза большее удельное электросопротивление в сравнении с медью, серебряной, кадмиевой и хромциркониевой бронзами. К этой же группе принадлежат

сплавы Мц2 и Мц3. Высокая жаропрочность сплава Мц2 обусловлена интерметаллидом Ni_2Si , а сплава Мц3 — NiBe .

Таблица 4.8

Режимы заковки и старения промышленных дисперсионно-твердеющих сплавов на медной основе

Марка сплава	Температура нагрева под заковку, °С	Старение	
		температура, °С	время, ч
ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5	820±10	450	2
БрАЖН10-4-4	980	400	2
БрБ2	760–780	320	2
БрБНТ1,9	760–780	320	2
БрБНТ1,7	760–780	320	2
БрБ2,5	800	300	2
БрХ0,5	950–980	400	6
БрЦр0,4	920	450	3
БрЦрХ0,8-0,6	950±10	450	2
МНА13-3	900	500	2
МНА6-1,5	900	500	2

Все дисперсионно-твердеющие бронзы высокой электропроводности применяют в термически упрочненном состоянии. Их закаливают с температур 930–1000 °С (выдержка 2 ч в воде), а затем подвергают старению при 440–500 °С в течение 2–6 ч. В некоторых случаях используют термомеханическую обработку, вводя между закалкой и старением холодную деформацию.

В табл. 4.8 представлены марки и режимы термической обработки основных промышленных дисперсионно-твердеющих сплавов на медной основе.

Все эти сплавы претерпевают фазовые превращения в твердом состоянии и подвергаются закалке без полиморфного превращения. *Закалка* или *обработка на пересыщенный твердый раствор* преследует две цели:

- подготовить сплав к старению;
- добиться максимальной пластичности для дальнейшей деформации.

Температура нагрева под заковку должна обеспечивать возможно более полное растворение избыточных фаз в матричной фазе и находиться в двойной системе между линиями сольвуса и солидуса.

Хотя процессы растворения избыточных фаз значительно ускоряются с повышением температуры, нагрев в непосредственной близости от линии солидуса технологически нерационален. В этом случае из-за возможного перепада температур в садке и неточности теплового контроля возникает опасность пережога (оплавления) изделия. Отсюда вытекает строгое требование контролировать температуру в закалочных печах с точностью $\pm 10^\circ\text{C}$. Слишком высокие температуры нагрева под закалку могут привести также к росту зерна до недопустимых размеров.

Время выдержки определяется полнотой процессов растворения избыточных фаз: чем дисперснее избыточная фаза, тем быстрее она растворяется. Деформированные сплавы выдерживают меньшее время, чем литые. Если избыточная фаза полностью не растворена, то получить оптимальные свойства после старения не представляется возможным. Длительные нагревы приводят к росту зерна, сильному окалинообразованию и нежелательному увеличению диффузионной зоны, состоящей из окислов легирующего элемента.

4.3.2.6. Области применения антифрикционных сплавов меди

Области применения антифрикционных сплавов меди весьма разнообразны.

Многокомпонентные, или специальные, латуни, обладающие достаточно высокой прочностью и коррозионной стойкостью, применяют в судостроении, электромашиностроении, теплотехнике.

Из латуней, легированных свинцом, изготавливают детали, работающие в условиях трения. Их используют в часовом производстве, автотракторной промышленности, типографском деле.

Оловянные бронзы с фосфором из-за высоких антифрикционных свойств и хорошей коррозионной стойкости применяют в машиностроении для изготовления подпятников тяжелых кранов и разводных мостов, прокладок подшипников и втулок, гаек ходовых винтов, шестерен, червячных колес и других деталей, работающих на трение. Наибольшее распространение получили алюминиевые бронзы. Алюминиевые бронзы используют прежде всего как заменители оловянных. Они распространены в морском судостроении, общем машиностроении, авто- и авиастроении. Из высокопрочных алюминиевых бронз изготавливают ответственные детали: шестерни, втулки, седла клапанов, гайки нажимных винтов, подшипники.

Свинцовые бронзы — один из лучших подшипниковых материалов. Из них изготавливают опорные и шатунные подшипники мощных турбин, авиационных моторов, дизелей и других быстроходных машин.

Медные сплавы применяют также в химической, нефтехимической, текстильной промышленности.

4.4. Антифрикционные сплавы и припои

Антифрикционные сплавы широко применяют в автомобилестроении для заливки вкладышей коренных и шатунных подшипников коленчатых валов двигателей, опорных втулок распределительных валов, шатунных вкладышей коленчатых валов компрессоров и в некоторых других случаях. Иногда перезаливку вкладышей осуществляют и на авторемонтных предприятиях.

На карбюраторных автомобильных двигателях преимущественно применяют малосурьмянистый свинцовый сплав СОС 6-6, обладающий особенно хорошей сопротивляемостью циклическим деформациям и выкрашиванию.

На более старых марках карбюраторных двигателей широко применялись оловянистые баббиты Б88 и Б83, а также свинцово-сурьмянистый баббит БТ и др.

Применение их в качестве заменителей, в особенности при восстановлении втулок распределительных валов автомобильных двигателей, допустимо и в настоящее время.

Для заливки вкладышей коренных и шатунных подшипников коленчатых валов дизельных автомобильных двигателей применяют свинцовистую бронзу, обычно БрС30.

Преимуществами тонкостенных вкладышей, залитых свинцовистой бронзой или алюминиевым сплавом, является их большая прочность, меньшая вероятность выкрашивания, хорошая теплопроводность, высокая температуростойкость. Так, подшипники из свинцовистой бронзы могут устойчиво работать при температуре до 350 °С.

Недостатки таких вкладышей — несколько больший износ шеек коленчатых валов двигателей, сложная технология перезаливки в условиях авторемонтных предприятий.

4.5. Алюминиевые сплавы

За последние сорок лет в России и за рубежом из-за дефицитности олова и свинца резко возросло использование сплавов на менее дефицитной основе — алюминиевых подшипниковых сплавов. Алюминиевые сплавы обладают хорошими антифрикционными свойствами, достаточной усталостной прочностью, высокой теплопроводностью, хорошей коррозионной стойкостью в масляных средах и достаточно хорошими механическими и технологическими свойствами. Эти качества во многом определили тенденцию замены ими антифрикционных сплавов на свинцовой и оловянной основе, а также свинцовистой бронзы. В пользу алюминиевых подшипниковых сплавов говорят и экономические соображения. Их применяют в виде тонкого слоя, нанесенного на стальное основание, т.е. в виде биметаллического материала. Последние изготавливают штамповкой из биметаллической полосы или со слоем алюминиевого сплава, соединенного со сталью в процессе совместного пластического деформирования при прокатке. Алюминиевые сплавы употребляют и для изготовления монометаллических деталей (втулок, подшипников, шарниров и др.) Для монометаллических подшипников употребляются сравнительно твердые прочные сплавы, а слой биметаллических вкладышей изготавливают из менее твердого пластичного металла. В зависимости от химического состава различают две группы сплавов:

- сплавы алюминия с сурьмой, медью и другими элементами, которые образуют твердые фазы в мягкой алюминиевой основе. Наибольшее распространение получил сплав АСМ, который содержит сурьму (до 6,5 %) и магний (0,3–0,7 %) и хорошо работает при высоких нагрузках и больших скоростях в условиях жидкостного трения; его широко применяют для изготовления вкладышей подшипников коленчатого вала двигателей тракторов и автомобилей;
- сплавы алюминия с оловом и медью, например АО20-1 (20 % олова и до 1,2 % меди) и АО9-2 (9 % олова и 2 % меди). Они хорошо работают в условиях сухого и полужидкого трения и по антифрикционным свойствам близки к баббитами. Их используют для производства подшипников в автомобилестроении, транспортном и общем машиностроении.

Кроме того, для заливки вкладышей дизельных и карбюраторных двигателей применяют и другие сплавы на алюминиевой основе, например сплав АССб—5. Алюминиевые сплавы классифицируют преимущественно по микроструктурному признаку. Такая классификация отражает в большей степени антифрикционные свойства сплавов, так как общепризнанной является роль мягких структурных составляющих в уменьшении износа и увеличении сопротивляемости трущейся пары. К 1-й группе относят сплавы, имеющие включения твердых структурных составляющих (FeAl_3 , Al_3Ni , CuAl_2 , Mg_2Si , AlSb , кремний β (Si)) в пластичной основе металла. В сплавах 2-й группы наряду с твердыми составляющими имеются мягкие включения.

Химический состав основных алюминиевых антифрикционных сплавов приведен в табл. 4.9.

В связи с распространением за рубежом выпуска безгильзовых двигателей, в которых при использовании эвтектических силуминов для литья блоков цилиндров удалось решить проблему износа рабочих поверхностей цилиндров и поршней, также наблюдается увеличение объемов производства антифрикционных отливок, получаемых литьем под давлением. Литейные алюминиевые сплавы, содержащие элементы, мас. %: кремний 16—18; медь 4—5; магний 0,45—0,65; железо 0,6—1,1 и алюминий — остальное, используются в двигателях автомобилей, а позднее — в двухтактных двигателях компрессоров. Аналогами таких сплавов в России являются сплавы АК16М2 Н и АК20М2Н. Свойства сплавов повышаются при использовании методов беспористого литья под давлением.

Примерное назначение алюминиевых антифрикционных сплавов и условия работы изделий из них приведены в табл. 4.10.

На антифрикционный слой изделий наносят покрытие мягкого металла или антифрикционное полимерное покрытие толщиной от 0,003 до 0,03 мм. Допускается по соглашению с потребителем в технически обоснованных случаях не покрывать изделия мягким металлом или полимерным покрытием.

Положительные результаты получения беспористых отливок и антифрикционных сплавов на основе алюминия позволили использовать эту технологию для изготовления подшипников скольжения и деталей пусковых двигателей. Для повышения служебных свойств этих антифрикционных деталей, ранее отливаемых в кокиль, рекомендованы новые процессы литья под низким давлением и проведена

Таблица 4.9

Составы (% алюминий — остальное) алюминиевых антифрикционных сплавов

Основные компоненты										Примеси, не более								
Марка сплава	Олово	Магний	Марганец	Сурьма	Медь	Никель	Кремний	Теллур	Титан	Алюминий	Железо	Кремний	Магний	Марганец	Цинк	Каждая в отдельности	Сумма	Прочие примеси
	АО9-2 8,0–10,0	—	—	—	2,0–2,5	0,8–1,2	0,3–0,7	—	—	Остальное	0,5	—	—	—	—	—	0,05	
АО3-7	2,5–3,5	—	0,5–0,8	—	7,0–8,5	—	0,6–1,2	—	—	То же	0,5	—	—	0,35	—	0,20	—	—
АО6-1	5,0–7,0	—	—	—	0,7–1,3	0,7–1,3	—	—	—	»	0,3	0,3	—	—	—	—	—	0,3
АО9-1	8,0–10,0	—	—	—	0,8–1,2	—	—	—	0,02–0,2	»	0,5	0,7	—	—	—	0,25	0,05	0,10
АО12-1	11–14	—	—	—	0,8–1,2	0,4–0,6	—	—	—	»	0,3	—	—	—	—	—	0,05	0,55
АО20-1	17,0–23,0	—	—	—	0,7–1,2	—	—	—	0,02–0,2	»	0,5	0,5	—	—	—	0,25	0,05	0,10
АН-2,5	—	—	—	—	—	2,7–3,3	—	—	—	»	0,5	0,4	0,3	—	—	—	0,05	0,10
АСМ	—	0,3–0,7	—	3,5–6,5	—	—	—	—	—	»	0,75	0,5	0,1	—	0,2	0,1	0,05	0,10
АМСТ	—	—	—	4,6–6,5	0,7–1,2	—	—	0,03–0,3	0,03–0,12	»	0,75	0,5	—	—	0,2	0,1	0,05	0,3
АМК	—	—	—	0,5	0,8–1,2	—	9,0–11,0	0,1	0,1	»	0,4	—	—	0,3	0,1	—	0,1	0,3

Примечание. Для сплава марки АО3-7, выплавленного в чугунных тиглях, содержание примеси железа допускается до 0,7 %.

корректировка составов алюминиево-оловянных сплавов и силуминов с высоким содержанием меди, отливки из которых подвергаются старению без предварительной закалки.

Таблица 4.10

**Примерное назначение алюминиевых антифрикционных сплавов
и условия работы изделий из них**

Марка сплава	Назначение сплава	Условия работы изделий			
		нагрузка, МН/м ² (кгс/см ²)	скорость скольжения, м/с	темпе- рату- ра, °С	рекомендуе- мая твердость вала, НВ
		не более			не менее
АОЗ-7	Для отливки монометаллических вкладышей и втулок	19,5 (200)	15	100	320
АО9-2		24,5 (250)	15	100	250
АО6-1	Для получения биметаллической ленты со сталью и дюралюминием методом прокатки или сварки взрывом с последующей штамповкой вкладышей с толщиной антифрикционного слоя менее 1 мм	31,2 (320)	20	120	250
АО9-1		29,5 (300)	20	120	250
АО12-1	Для получения биметаллической ленты со сталью методом прокатки	29,5 (300)	20	120	250
АО20-1	Для получения биметаллической ленты со сталью и дюралюминием методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей с толщиной антифрикционного слоя менее 1 мм	29,5 (300)	20	120	200
АН-2,5	Для отливки вкладышей и получения прокатной моно- и биметаллической ленты с последующей штамповкой вкладышей с толщиной антифрикционного слоя менее 0,5 мм	19,5 (200)	15	100	250

Окончание табл. 4.10

Марка сплава	Назначение сплава	Условия работы изделий			
		нагрузка, МН/м ² (кгс/см ²)	скорость скольжения, м/с	температура, °С	рекомендуемая твердость вала, НВ
		не более			не менее
АСМ	Для получения биметаллической ленты со сталью методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей с толщиной антифрикционного слоя менее 0,5 мм	19,5 (200)	10	100	250
АМСТ	Для получения биметаллической ленты со сталью методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей с толщиной антифрикционного слоя менее 0,5 мм	39,2 (400)	15	120	200
АМК	Для получения биметаллической ленты со сталью методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей с толщиной антифрикционного слоя менее 1 мм	50,0/500	20,0	120	250

Медь обеспечивает алюминиево-кремниевым сплавам более высокую твердость, износостойкость и восприимчивость к термической обработке. Дополнительные присадки в заэвтектические алюминиево-кремниевые-медные сплавы редкоземельных металлов в количестве 0,005–0,035 % и фосфора в количестве 0,001–0,015 % способствуют измельчению литого зерна и повышению твердости отливок. Модифицирующий эффект фосфора сохраняется более длительное время, чем редкоземельных металлов.

В силуминах, содержащих 16–25 % кремния, увеличение присадки меди с 0,2 до 3,5 % способствует повышению при литье под низким давлением временного сопротивления растяжению с 200–240 МПа до 330 МПа. Такие заэвтектические силумины отличаются трещиностойкостью, высокой жидкотекучестью и обеспечивают однородную структуру и повышенную износостойкость в толстостенных отливках. Твердость отливок с толщиной стенок 16–24 мм составляет 106–112 НВ. Примеси марганца в количестве 0,2–0,7 % в алюминиево-кремниевых-медных сплавах повышают прочность, твердость и износостойкость отливок, но при этом снижаются литейные свойства. После закалки и искусственного старения износостойких отливок

из АК16М2Н и АК20М2Н диаметр дендритных ячеек не превышает 20–40 мкм, а при литье в металлические формы с последующей закалкой и старением — 10...30 мкм.

Сплав АК20М2Н оказался весьма чувствительным к присадкам и примесям железа и серы, которые заметно снижают пластические свойства сплава в отливках и вызывают огрубение эвтектики. Примеси кальция, натрия, бария и сурьмы в количестве 0,01–0,05 % не оказывают существенного влияния на первичный кремний и эвтектику сплава, а добавки в таком количестве титана и бора измельчают структуру и способствуют повышению износостойкости.

4.6. Сплавы на цинковой основе

Цинковые сплавы в качестве антифрикционных хотя и известны давно, но не получили широкого распространения. Цинковые сплавы, однако, обладают рядом ценных свойств, которые дают возможность использовать их во многих случаях взамен бронз и баббитов. Сплавы на цинковой основе, обладая низкой температурой плавления (~400 °С), в большей степени, чем бронзы и алюминиевые сплавы, размягчаются при нагреве, благодаря чему легче прирабатываются. По этой причине подшипники из цинковых сплавов меньше изнашивают сопряженные поверхности цапфы при попадании абразивов. Частицы абразивов легче внедряются в трущуюся поверхность и меньше повреждают за счет микрорезания цапфу.

Из-за хорошей технологичности из антифрикционных цинковых сплавов изготавливают моно- и биметаллические изделия и полуфабрикаты трущихся деталей методами литья и обработки давлением. Легко достигается соединение цинкового сплава со сталью литейным способом и совместной прокаткой со стальной заготовкой. Соединение жидкого цинкового сплава со сталью достигается за счет слоя жидкого цинка, наносимого способом горячего цинкования.

Подшипники и другие детали из цинковых сплавов применяются в литом и обработанном давлением (прокатка, прессование) состояниях. Составы стандартных сплавов (ГОСТ 21437–95) и свойства их в литом и прокатанном виде приведены в табл. 4.11.

Таблица 4.11

**Составы литейных и деформируемых антифрикционных цинковых сплавов
(ГОСТ 21437–95), мас. %**

Марка сплава	Алюминий	Медь	Магний
ЦАМ9-1,5Л ЦАМ9-1,5	9–11	1–2	0,03–0,06
ЦАМ10-5Л ЦАМ10-5	9–12	4–5,5	0,03–0,06

Примечание. Примесей не более 0,35 %; остальное цинк.

Отличительной особенностью цинковых сплавов от бронз и алюминиевых является повышение после горячей обработки давлением (250–300 °С) прочности и пластичности сплавов, что сказывается и на показателях усталостной прочности. Так, например, для литого сплава ЦАМ9-1,5 предел выносливости при переменном изгибе вращающихся круглых образцов 5–10 кгс/мм², а прессованный металл имел 10–11 кгс/мм².

Марки и химический состав цинковых антифрикционных сплавов должны соответствовать данным, приведенным в табл. 4.12.

Таблица 4.12

Химический состав цинковых антифрикционных сплавов

Марка сплава	Массовая доля, %									
	основных компонентов				примесей, не более					
	алюминий	медь	магний	цинк	свинец	железо	олово	кадмий	кремний	
ЦАМ9-1,5	9,0–11,0	1,0–2,0	0,03–0,06	Основа	0,02	0,10	0,01	0,015	0,03	
ЦАМ10-5	9,0–12,0	4,0–5,5	0,03–0,06	То же	0,02	0,10	0,01	0,015	0,03	

Примечание. Примесей не более 0,35 %; остальное цинк.

В табл. 4.13 приведены механические свойства цинковых антифрикционных сплавов, а в табл. 4.14 — их примерное назначение и допустимые условия работы.

При изготовлении подшипников из цинковых сплавов необходимо учитывать несколько больший коэффициент их линейного расширения по сравнению с бронзами и баббитами.

Таблица 4.13

Механические свойства цинковых антифрикционных сплавов

Марка сплавов	Временное сопротивление σ_v , МПа	Относительное удли- нение δ , %	Твердость НВ
	не менее		
Литейные сплавы			
ЦАМ9-1,5Л	245	1,0	95
ЦАМ10-5Л	245	0,4	100
Сплавы, обрабатываемые давлением			
ЦАМ9-1,5	294	10	85
ЦАМ10-5	343	4	90

Таблица 4.14

Примерное назначение и условия работы цинковых антифрикционных сплавов

Марка сплава	Примерное назначение сплава	Условия работы изделий		
		удельная нагрузка, МПа	скорость скольже- ния, м/с	темпе- рату- ра, °С
		не более		
ЦАМ9-1,5Л	Для отливки монометаллических вкладышей, втулок, ползунов и т. д.	9,8	8	80
	Для получения биметаллических изделий с металлическим каркасом методом литья	19,6	10	100
ЦАМ9-1,5	Для получения биметаллической ленты из стали и дюралюминия методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей	24,5	15	100
ЦАМ10-5Л	Для отливки подшипников и втулок различных агрегатов	9,8	8	80
ЦАМ10-5	Для получения прокатных полос для направляющих скольжения металло-режущих станков и других изделий	19,6	8	80

Благодаря хорошим литейным свойствам и сопротивляемости истиранию цинковые сплавы, легированные алюминием, медью и магнием, широко применяют также в полиграфической промышленности для отливки шрифтов ручного и машинного набора — лино- и моно-типного. Типографские цинковые сплавы содержат меньшее количество алюминия, чем антифрикционные — до 7,5 %.

5. Антифрикционные сплавы на основе железа, металлокерамические и неметаллические материалы

.....

5.1. Антифрикционные чугуны

Антифрикционный чугун — это любой серый, ковкий или модифицированный чугун, имеющий перлитную и даже перлитно-ферритную структуру, если количество перлита как правило не менее 85 %. Кроме того, имеются специальные антифрикционные чугуны.

Основные марки антифрикционных чугунов (табл. 5.1) установлены ГОСТ 1585—85, твердость и некоторые характеристики их структуры приведены в табл. 5.2. Чугуны марок АЧС-1-АЧС-6 — серые чугуны с пластинчатым графитом, чугуны АЧВ-1 и АЧВ-2 — высокопрочные чугуны с шаровидным графитом, ЧШГ, АЧК-1 и АЧК-2 — ковкие чугуны. При использовании антифрикционных чугунов нужно учитывать условия работы узла трения (скорость скольжения v , давление p), а также вид, состояние и твердость сопряженной трущейся детали (состояние проката после нормализации, закалки и т. д.). Антифрикционные свойства чугунов в значительной степени зависят также от типа смазочного материала и температуры узла трения.

Из семи марок, приведенных в ГОСТе на отливки из антифрикционного чугуна (табл. 5.1), марка (АСЧ-1) применяется без термической обработки, две марки (АКЧ-1 и АКЧ-2) — только после термической обработки и две марки (АВЧ-1 и АВЧ-2) могут получаться как в литье, так и путем термической обработки.

Таблица 5.1
Химический состав и применение антифрикционного серого чугуна, %

Марка по ГОСТ 1958-57	Углерод	Кремний	Марганец	Фосфор	Сера (не более)	Хром	Никель	Прочие примеси	Примечание
Серый с пластичным графитом									
АСЧ-1	3,2–3,6	1,6–2,4	0,6–0,9	0,15–0,2	0,12	0,2–0,35	0,2–0,4	Меди до 0,7	Для работы в паре с термически обработанным валом
АСЧ-2	3,2–3,8	1,4–2,2	0,4–0,7	0,15–0,4	0,12	0,2–0,4	0,2–0,4	Титана до 0,1, меди до 0,5	Для работы в паре с сырым валом
АСЧ-3	3,2–3,8	1,7–2,6	0,4–0,7	0,15–0,4	до 0,12	до 0,3	0,2–0,4	То же	Для работы в паре с сырым валом
Высокопрочный с шаровидным графитом									
АВЧ-2	2,8–3,5	2,2–2,7	0,5–0,8	до 0,2	до 0,03	–	–	Магния > 0,03	Для работы в паре с термически обработанным валом
АВЧ-1	2,8–3,5	1,8–2,5	0,5–1,2	до 0,2	до 0,03	–	–	Магния > 0,03, меди < 0,7	Для работы в паре с сырым валом
Ковкий с углеродом отжига									
АКЧ-2	2,6–3,0	0,8–1,3	0,3–0,6	до 0,15	до 0,12	до 0,06	–	–	То же
АКЧ-1	Химический состав такой, как и АКЧ-2, но содержит перлита 80–100 %								

Антифрикционные чугуны (АЧ) предназначены для применения в узлах трения со смазкой; они должны обеспечивать нормальную работу трущихся деталей без заедания и образования задиров при достаточно высокой износостойкости, например в подшипниках для валов, направляющих для ползунов, в червячных и других шестернях (ГОСТ 1585–85). Основным критерием для оценки антифрикционного чугуна являются микроструктура и твердость, а для некоторых марок чугуна также и содержание легирующих элементов. Микроструктура АЧ обычно содержит твердую перлитную, перлитно-ферритную или аустенитную металлическую основу и различной формы графитные включения. Решающее влияние на триботехнические свойства чугуна оказывают включения графита. Мягкие графитные включения способствуют эффективному самосмазыванию при трении и хорошему удержанию смазочных масел, а также обеспечивают высокую теплопроводность, что создает нормальные тепловые условия работы узла трения. Дополнительное повышение износостойкости антифрикционных чугунов достигается наличием в их структуре небольших количеств цементита и фосфидной эвтектики, количество и морфология которых зависит от состава сплава, условий охлаждения литья и режима термической обработки. Хорошая структура АЧ содержит, как правило, более 85 % мелкопластинчатого перлита с включениями мелкопластинчатого или шаровидного графита (рис. 5.1).

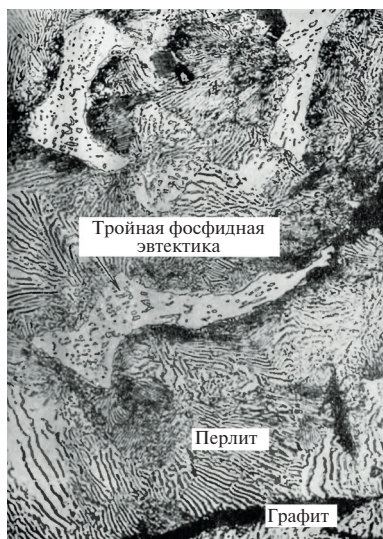


Рис. 5.1. Микроструктура антифрикционного серого чугуна, x1000

Сопоставление чугуна с другими антифрикционными материалами указывает на значительно более низкую стоимость его в сравнении с антифрикционными сплавами цветных металлов (рис. 5.2). В связи с этим следует отметить, что важнейшими особенностями антифрикционного чугуна являются высокая износостойкость и хорошие литейные свойства. Особенностью ГОСТа является также дифференциация марок чугуна в зависимости от материала вала (закаленного или незакаленного).

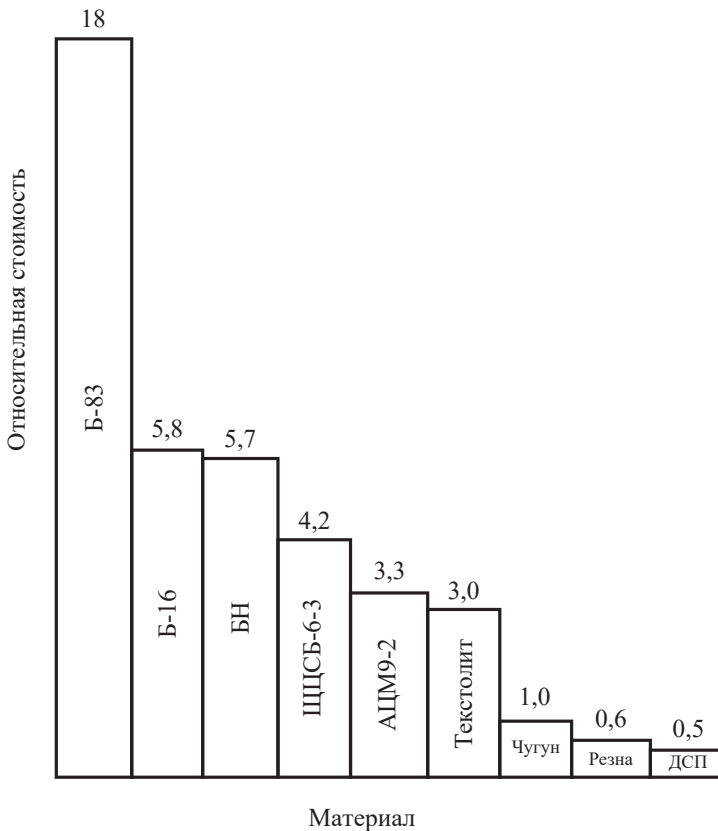


Рис. 5.2. Диаграмма относительной стоимости антифрикционных материалов

Основные функциональные преимущества антифрикционных чугунов по сравнению с цветными антифрикционными сплавами (бронзами, цинковыми и алюминиевыми сплавами, баббитами) — значительно более высокая износостойкость, хорошая работоспособность при высоких давлениях, повышенных температурах и граничной смаз-

ке. Указанные преимущества чугуна перед цветными металлами в эксплуатации состоит в том, что повышение температуры вызывает у чугуна сравнительно меньшее изменение таких характеристик, как сила трения и коэффициент трения, чем у бронзы или баббита. Изменение скорости вращения вызывает у чугуна иные качественные изменения, чем у бронзы и баббита. В то время как коэффициент трения бронзы и баббита монотонно снижается с увеличением скорости вращения, этот показатель для чугуна обнаруживает после некоторого снижения с повышением скорости вращения резкий скачок при превышении значения скорости вращения величины в 8 м/с. Сочетание этих особенностей с учетом прочностных характеристик отдельных типов чугуна служит исходным моментом при решении вопроса о выборе типа и марки чугуна для каждого конкретного случая. Выявился также и органический недостаток, присущий чугуну: ухудшенная в сравнении с бронзой прирабатываемость. Эта присущая чугуну всех марок особенность приводит к ограничению допустимых скоростей скольжения, а также и удельных давлений. Существенный недостаток антифрикционных серых чугунов — их хрупкость.

Антифрикционный чугун может работать как заменитель цветных сплавов в подшипниковых узлах. Однако для удовлетворительной работы требуется:

- чистая механическая обработка и точное сопряжение трущихся поверхностей деталей;
- непрерывная и хорошая смазка;
- повышенные против обычных на 15—30 % зазоры;
- приработка на холостом ходу и постепенное повышение рабочих нагрузок. При ударной нагрузке антифрикционный чугун работает хуже.

Для определения возможности замены бронзы и использования антифрикционного чугуна в какой-либо конструкции узла трения станка или машины подсчитывают величины удельного давления p , окружной скорости v и удельной мощности pv и сравнивают их с допустимыми для данной марки антифрикционного чугуна. Так, для указанных в табл. 5.1 марок допустимые величины приведены в табл. 4.1, а твердость и характеристики структуры — в табл. 5.2.

Из антифрикционных чугунов изготавливают различные детали узлов трения (втулки, вкладыши, подшипники скольжения, уплотнения, ролики, червячные зубчатые колеса, направляющие для ползунов и по-

добных деталей машин, работающих в условиях трения), изнашивающиеся детали горнорудного и угольного оборудования, строительных и дорожных машин, тракторов и экскаваторов, сельскохозяйственных машин, некоторые трущиеся детали турбин, компрессоров, двигателей и насосов. За последние годы разработан антифрикционный чугун новых марок, предназначенный для работы при особо высоких нагрузках (до 150–300 кгс/см²), высоких окружных скоростях (до 5 м/с) или повышенных (до 300 °С) температурах (табл. 5.3).

Таблица 5.2

Твердость и характеристики структуры антифрикционных чугунов по ГОСТ 1585–85

Марка чугуна	Количество, %		Твердость, НВ
	перлита	цементита	
АЧС-1	70–100	Не допускается	180–241
АЧС-2	70–100	То же	180–229
АЧС-3	70–85	»	160–190
АЧС-4	85–100	»	180–229
АЧС-5	Свыше 45 А*	Менее 25 К*	180–290
АЧС-6	85–100	Не допускается	140–180
АЧВ-1	45–96	До 5	210–260
АЧВ-2	45–70	До 5	167–197
АЧК-1	85–100	Не допускается	187–229
АЧК-2	45–70	То же	167–197

* Указано количество аустенита А и карбидов К в литой структуре чугуна; после заковки должно быть не менее 80 % А и не более 8 % К.

Таблица 5.3

Применение антифрикционных чугунов

Марка чугуна	Назначение	Предельные режимы работы		
		p , МПа	v , м/с	pv , МПа·м/с
АЧС-1	Для работы в паре с закаленным или нормализованным валом	5,0	5,0	12,0
		14,0	0,3	2,5
АЧС-2	То же	10,0	0,3	2,5
		0,1	3,0	0,3
АЧС-3	Для работы в паре с термообработанным или нетермообработанным валом	6,0	1,0	5,0
АЧС-4	Для работы в паре с закаленным или нормализованным валом	15,0	5,0	40,0

Окончание табл. 5.3

Марка чугуна	Назначение	Предельные режимы работы		
		p , МПа	v , м/с	pv , МПа·м/с
АЧС-5	Для работы в особо нагруженных узлах трения в паре с закаленным или нормализованным валом	20 30	1,0 0,4	20,0 12,5
АЧС-6	Для работы в узлах трения при температуре до 300 °С в паре с нетермообработанным валом	9,0	4,0	9,0
АЧВ-1	Для работы в узлах трения с повышенными скоростями в паре с термообработанным валом	1,5 20,0	10,0 1,0	12,0 20,0
АЧВ-2	То же	1,0 12,0	5,0 1,0	3,0 12,0
АЧК-1	Для работы в паре с закаленным или нормализованным валом	20,0	2,0	20,0
АЧК-2	Для работы в паре с нетермообработанным валом	0,5 12,0	5,0 1,0	2,5 12,0

Поскольку износостойкость сплавов не связана однозначно с уровнем механических свойств, определяемых при растяжении, а с точки зрения структурно-энергетической теории обусловлена способностью структуры адаптироваться к условиям внешнего нагружения и поглощению энергии внешнего воздействия без разрушения, необходимо в целях рационального выбора чугунов для конкретных узлов трения рассмотреть структурные факторы повышения износостойкости чугунов.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации износостойкие серые чугуны разделяют на следующие основные группы:

- антифрикционные для подшипников скольжения;
- фрикционные для тормозных узлов механизмов;
- для гильз цилиндров дизельных двигателей;
- для поршневых колец;
- для седел клапанов и направляющих втулок клапанов;
- для направляющих металлорежущих станков.

Сопротивление изнашиванию высокопрочного чугуна определяется главным образом его металлической основой и твердостью. Износостойкость увеличивается при переходе от ферритной к перлитной и бейнитной структурам металлической основы. ЧШГ с бейнитной металлической основой, несмотря на присутствие графита по абразив-

ной износостойкости, не уступает износостойкой стали 110Г13Л. Соотношение значений относительной износостойкости в абразивной среде низколегированного чугуна с пластинчатым графитом, перлитного и бейнитного ЧШГ, а также белого чугуна и марганцовистой стали следующее: 1,0 : 1,4 : 2,2 : 4,0 : 2,2.

При трении «металл—металл» со смазкой высокопрочные чугуны по антифрикционным свойствам превосходят ряд других антифрикционных материалов. Соотношение значений относительного износа бронзы ОЦС 5-2-5, ЧПГ, ЧШГ с зернистым перлитом, бейнитного ЧШГ, азотированного ЧШГ, мартенситного ЧШГ следующие: 23 : 14 : 8 : 8 : 6 : 5.

Легирование до 4–5 % кремния за счет образования силикоферрита повышает износостойкость ферритного ЧШГ при сухом трении. Легирующие элементы способствуют увеличению доли перлита в матрице высокопрочного чугуна и повышают его износостойкость.

Комплексное легирование кремнием (2,5–4,5 %), марганцем (0,5–2,5 %) и медью (до 2,0 %) обеспечивает высокую износостойкость ЧШГ, а абсолютный износ этого чугуна с перлитной структурой в абразивной среде (кварцевый песок) может быть определен по формуле

$$\Delta M = 3,69 + 2,8 \text{ Si} - 1,0 \text{ Cu} - 0,57 \text{ CuMn},$$

где ΔM — потеря массы испытуемого образца, г; Si, Cu, Mn — массовая доля элементов в чугуне, %.

При увеличении содержания фосфора с 0,1 до 0,7–0,8 % износостойкость нелегированного ЧШГ повышается в несколько раз, что связано с образованием в структуре равномерно распределенных включений фосфидной эвтектики. Более высокое содержание фосфора снижает износостойкость ЧШГ из-за выкрашивания крупных включений фосфидной эвтектики.

Феррит является наименее износостойкой структурной составляющей, поэтому наличие его в структуре чугуна снижает твердость и износостойкость последнего. В наибольшей степени это проявляется при содержании феррита более 5–15 %.

Антифрикционные свойства чугунов в значительной степени определяются строением и количеством графитной составляющей. Чугун с глобулярной формой графита и с толстыми пластинками более износостоек, чем чугун с тонкими пластинками. В структуре чугуна должен отсутствовать свободный цементит.

Фрикционный чугун используется в тормозных узлах и фрикционных передаточных механизмах, работающих при трении без смазки. Основные требования, предъявляемые к фрикционному чугуну, — высокое и стабильное значение коэффициента трения ($f = 0,25 \dots 0,50$), высокие износостойкость, теплопроводность, теплостойкость и термостойкость. Для предотвращения схватывания между элементами пары трения фрикционный чугун должен иметь минимальную склонность к пластическому деформированию, т. е. высокий предел текучести.

Оптимальное сочетание износостойкости и коэффициента трения обеспечивается наличием в структуре чугуна перлитной матрицы с дисперсностью Пд1,0—Пд1,4, содержание феррита не должно превышать 10 %. Фосфидная эвтектика должна быть в виде отдельных включений площадью ФЭп6000. Графит должен быть пластинчатой или завихренной формы (ПГф1, ПГф2, ПГф3), равномерно распределенный ПГр1, с длиной пластин $l = 60 \dots 200$ мкм и расстоянием между ними около $1/3l$. При формировании точечного междендритного графита износостойкость чугуна резко снижается. Доля включений графита 2—6 % (ПГ2, ПГ4, ПГ6).

Твердость НВ фрикционного серого чугуна должна составлять 1900—2600 МПа. При повышении твердости более 2600 МПа износостойкость чугуна увеличивается, но вместе с тем уменьшается коэффициент трения, что приводит к увеличению тормозного пути. Установлена корреляционная зависимость между износом I , %, на 1000 км эксплуатации тормозных колодок из серого чугуна и его твердостью НВ:

$$I = 26,5 e^{-0,01 \text{ НВ}}.$$

Для преобразования прямолинейного возвратно-поступательного движения поршней во вращательное движение коленчатого вала служит кривошипно-шатунный механизм. Он включает блок цилиндров и головку блока цилиндров, поршни с кольцами, поршневые пальцы, шатуны, коленчатый вал с подшипниками, маховик и поддон. Надежность и долговечность многих двигателей внутреннего сгорания определяется эксплуатационной стойкостью чугунных деталей цилиндропоршневой группы, работающих при знакопеременных нагрузках, трении и коррозии в газообразных продуктах сгорания топлива.

Чугунные гильзы мощных дизельных двигателей со встречно движущимися поршнями представляют наиболее напряженные литые детали с изменяющимся по периметру температурным полем. Наиболь-

шие переменные напряжения от силовых воздействий в цилиндрах возникают у адаптерных отверстий камеры сгорания, находящихся в средней части гильз, работа которых усложняется агрессивным действием продуктов сгорания топлива. Определение усталостной прочности чугуна в районе камеры сгорания гильз, имевшего удовлетворительную макро- и микроструктуру, показывает, что после длительной эксплуатации дизелей она значительно снижается за счет накопления необратимых изменений в тонкой структуре металлической основы и появления микротрещин.

В цилиндрах двигателей внутреннего сгорания из-за большой разности температур между внутренней поверхностью, где происходит сгорание, и наружной, которая в ряде случаев охлаждается водой, возникают значительные напряжения, внутренняя поверхность цилиндров компрессоров также работает в условиях трения при высоких нагрузках от давления сжимаемого воздуха и других газов. Цилиндры подвержены воздействиям местного нагрева и агрессивных сред.

Блок цилиндров — базовая деталь двигателя. В блоке цилиндров выполнены постели для коренных подшипников коленчатого вала, подшипников распределительного вала, а также рубашка охлаждения, окружающая цилиндры, главная масляная магистраль и места для крепления других узлов и приборов. В блоке V-образного двигателя два ряда цилиндров, расположенных под углом, и соответственно две головки блока — для правого и левого рядов цилиндров (рис. 5.3).

Блок цилиндров многоцилиндровых двигателей отливают из серого перлитного чугуна типа СЧ25, СЧ30 вместе с цилиндрами, внутренние поверхности которых обработаны шлифованием.

Структура блока должна состоять из высокодисперсного (сорбитообразного) перлита Пд0,3; Пд0,5, фосфидной или фосфидно-карбидной эвтектики, содержание графита не должно превышать 5 %. Графит должен быть среднепластинчатый, неориентированный ПГд90—ПГд180. В чугуне для гильз высокофорсированных дизелей допускается структурно-свободный цементит не выше балла Ц2, Цп4.

Износ гильз цилиндров двигателя ЗИЛ-130, изготовленных из низколегированного чугуна СЧ25 твердостью 187—207 НВ, составляет 1,5—2,5 мкм на 1000 км пробега автомобиля. Гильзы из среднелегированного фосфористого чугуна с $\text{Cr} = 0,5...0,6 \%$, $\text{Ni} = 0,4...0,6 \%$, $\text{Mo} = 0,5...0,6 \%$, $\text{Cu} = 0,7...0,8 \%$, $\text{P} = 0,4 \%$ и твердостью 197—255 НВ имеют износ 1,0—1,5 мкм на 1000 км пробега.

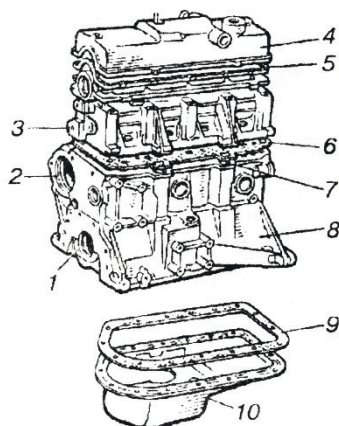


Рис. 5.3. Блок цилиндров двигателя автомобиля ВАЗ-2108:

1 — опоры коренных шеек коленчатого вала; 2 — блок цилиндров; 3 — головка цилиндров; 4 — крышка головки цилиндров; 5 — прокладка крышки; 6 — прокладка головки цилиндров; 7 — рубашка охлаждения; 8 — картер блока цилиндров; 9 — прокладка поддона картера; 10 — поддон

При легировании серого чугуна комплексом Cr–Ni–Mo–Cu минимальную интенсивность изнашивания 0,6–0,8 мг/ч имеет чугун с $\Sigma(\text{C} + \text{Si}) = 4,6...5,1\%$. При легировании комплексом Ni–Mo–Cu–V минимальную интенсивность изнашивания 3,0–5,0 мг/км имеет чугун с $\Sigma(\text{C} + \text{Si}) = 4,4...4,8\%$. При содержании в чугуне карбидообразующих элементов — хрома, ванадия и фосфора в соотношении $(\text{Cr} + 2\text{V}) : \text{P} = 1,2...1,4$ — в структуре фосфидной эвтектики появляется цементит, что повышает ее твердость. Сочетание двойной фосфидной эвтектики с высокодисперсным перлитом и среднепластинчатым графитом обеспечивает максимальную износостойкость гильз цилиндров автотракторных двигателей. Для повышения дисперсности и стабильности перлита чугун для гильз цилиндров обрабатывают микролегирующими добавками: 0,01–0,04 % В, 0,06–0,3 % Sb, 0,08–0,12 % Sn.

Блоки цилиндров многих марок автомобилей, в т. ч. мощных дизелей, изготовлены из алюминиевого сплава типа легированный силумин, например АК9ч, упрочняемый термообработкой в виде целой детали. Как одно целое с блоком цилиндров отливают и верхнюю часть картера двигателя.

Цилиндр может быть выполнен непосредственно в корпусе чугунного блока или в виде сменной гильзы, изготовленной из кислотостойкого чугуна и установленной в направляющих поясах цилиндров.

Для уменьшения износа верхней части гильзы в ней делают износостойкие вставки.

В головке цилиндров *1* двигателя ВАЗ-2108 (рис. 5.4) расположены камеры сгорания клиновидной формы с впускными и выпускными каналами, которые через прокладки соединяются с соответствующими трубопроводами. Свободное пространство внутри головки цилиндров образует охлаждающую рубашку, которая с задней стороны имеет выход к отводящему патрубку.

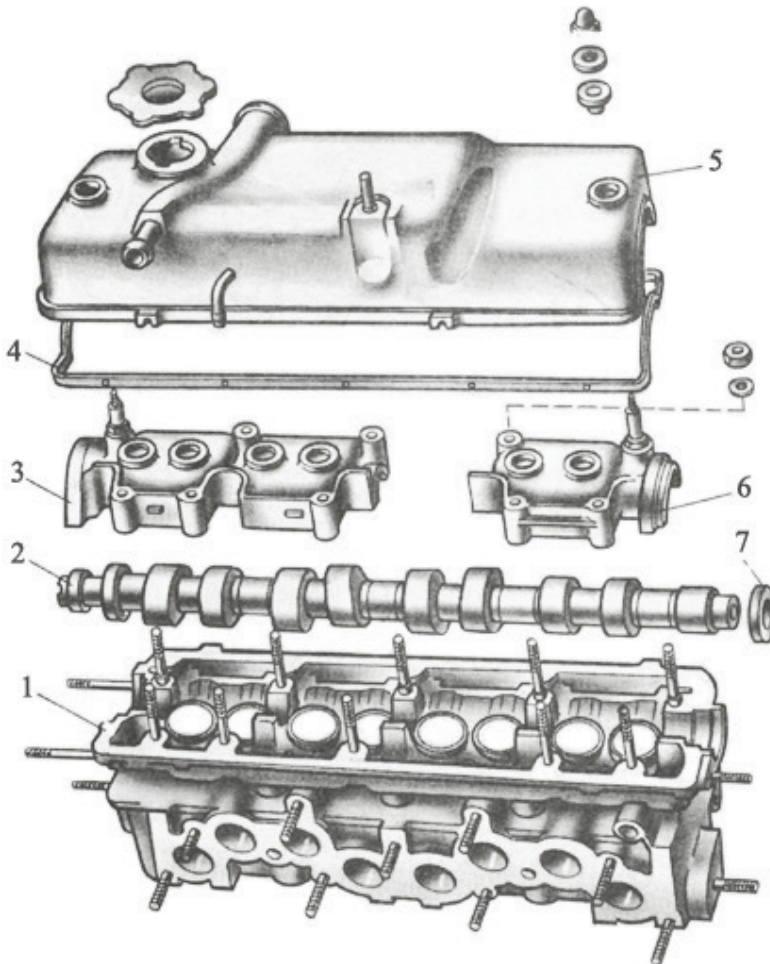


Рис. 5.4. Головка цилиндров двигателя ВАЗ-2108:

1 — головка цилиндров; *2* — распределительный вал; *3, 6* — задний и передний корпуса подшипников распределительного вала; *4* — прокладка; *5* — крышка головки цилиндров; *7* — сальник

В верхней части головки цилиндров расположены пять разъемных опор под шейки распределительного вала. Верхняя половина опоры находится в переднем 6 и заднем 3 корпусах подшипников, а нижняя — в головке цилиндров.

Механизм привода клапанов, установленный на головке цилиндров, закрывается силуминовой литой крышкой 5. По всему периметру нижней поверхности крышки имеется паз, в который вставляется уплотнительная резиновая прокладка 4.

Головки цилиндров автомобильных двигателей, имеющие сложную форму и нагревающиеся до 250 °С, изготавливаются из легкого сплава АК4. Данный сплав отличается жаростойкостью, его применяют для изготовления деталей, работающих при повышенных температурах (поршней двигателей внутреннего сгорания, головок цилиндров и т. д.). Отливка нагревается под закалку в термических печах с автоматическим контролем режимов термообработки. При последующем искусственном старении повышается твердость металла головки цилиндров.

В поршневую группу входят поршень с поршневыми кольцами, поршневой палец и шатун (рис. 5.5). Поршень 9 воспринимает усилия от расширяющихся газов и через шатун 5 передает их коленчатому валу. Поршни двигателей внутреннего сгорания, работающих при повышенных температурах до 250–270 °С, отливают из высоколегированного алюминиевого сплава — заэвтектического силумина АК12М2МгН. Верхняя часть поршня — головка — имеет днище. На головке поршня проточены три кольцевые канавки для двух компрессионных колец 10 и одного маслосъемного.

Для создания уплотнения между стенками цилиндра и движущимся поршнем предусмотрены поршневые кольца. Компрессионные кольца изготавливают из специального чугуна. Верхнее компрессионное кольцо покрывается по наружному диаметру слоем хрома, что повышает его износостойкость и предотвращает появление задиров на гильзах цилиндров. Нижнее кольцо фосфатируют или покрывают слоем олова для улучшения приработки.

Чугун для поршневых колец двигателей внутреннего сгорания должен отвечать требованиям ГОСТ 621–87. Наиболее предпочтительной является структура мелкопластинчатого или сорбитообразного перлита с равномерно распределенным графитом завихренной и прямолинейной формы размером не более ПГд180. Феррит допускается в виде

отдельных мелких включений общей площадью не более 5 %. Наличие структурно-свободного цементита не допускается, т. к. это приводит к повышенным твердости, хрупкости и плохой обрабатываемости колец. Твердость поршневых колец должна быть 98–106 HRB. Высокотемпературный отпуск заготовок поршневых колец при температуре 550–600 °С в течение 3 ч с последующим охлаждением на воздухе устраняет неравномерность распределения структурных составляющих и твердости, характерных для литого состояния.

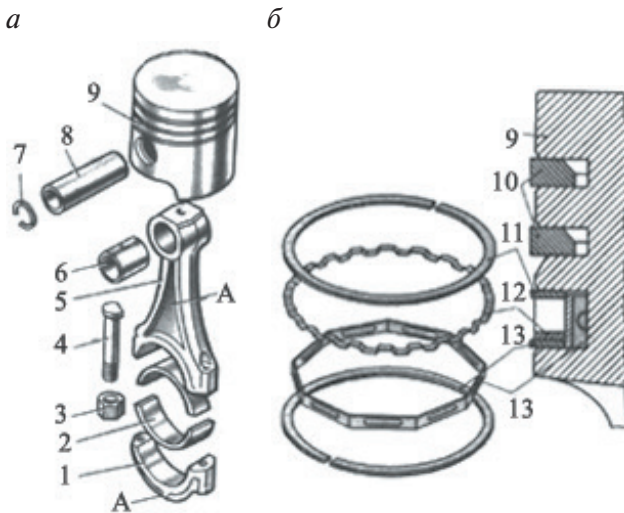


Рис. 5.5. Шатунно-поршневая группа:

а — поршень с шатуном; *б* — установка поршневых колец; 1 — крышка шатуна; 2 — шатунные вкладыши; 3 — гайка; 4 — болт; 5 — шатун; 6 — втулка верхней головки шатуна; 7 — стопорное кольцо; 8 — поршневой палец; 9 — поршень; 10 — компрессионные кольца; 11 — кольцевые диски маслосъемного кольца; 12 — осевой расширитель; 13 — радиальный расширитель; А — выступы

Маслосъемные кольца делают стальными в виде четырех элементов — двух дисков 11, радиального 13 и осевого 12 расширителей — или чугунными с прорезями для снимаемого со стенок цилиндра масла.

Чугун для сёдел клапанов и направляющих втулок клапанов должен иметь высокую износостойкость, быть устойчивым к ударным нагрузкам и воздействию температур до 600 °С. Эксплуатационная долговечность сёдел клапанов обеспечивается применением сложнолегированных серых чугунов. В зависимости от комбинации легирующих элементов (Cr, Ni, Mo, Cu, P) и режимов термообработки структура чугуна для сёдел клапанов может состоять из перлита, графита,

включений карбидно-фосфидной эвтектики или сорбита и включений карбидофосфидов. После высокого отпуска при температуре 570 °С в течение 1–1,5 ч металлическая основа представляет собой бейнит, в котором равномерно распределена сетка карбидно-фосфидной эвтектики площадью не более 5 % площади шлифа. Твердость должна быть 32,0–35,0 HRC₉. Сёдла из хромоникелевого чугуна в литом исходном состоянии имеют аустенитную основу с включениями карбидов. После высокого отпуска аустенит трансформируется в сорбит или троостит, твердость чугуна достигает 48,0–50,0 HRC₉.

Чугун для направляющих втулок клапанов бывает трех типов:

- микрولةгированный сурьмой;
- легированный фосфором и медью;
- сложнолегированный, в котором используются следующие легирующие комплексы: Ni-Cu-P-B, Cr-Ni-Mo-Cu, Cr-Ni-Mo-P.

Твердость чугунов первого и второго типов составляет 197–217 HB, а сложнолегированных чугунов — 240–270 HB. Микроструктура чугуна для направляющих втулок должна состоять из перлитной основы различной степени дисперсности, фосфидной или фосфидно-сурьмянистой эвтектики и включений пластинчатого или гнездообразного графита мелких и средних размеров — не более 200 мкм.

В современной практике производства сложнонапряженных деталей цилиндрично-поршневой группы все большее внимание уделяется легированным чугунам, обработанным комплексно различными легатурами и модификаторами. В связи с этим задача повышения качества сводится к тому, чтобы получить легированные чугуны без литейных дефектов, с мелкозернистой и однородной металлической основой и равномерно распределенным графитом, т. е. структурой, которая бы затрудняла пластическую деформацию при трении и усталостно-коррозионное разрушение литых изделий.

В некоторых случаях, например для распределительных валов двигателей, высокая износостойкость может быть достигнута с использованием отливок из серого чугуна с отбеленным поверхностным слоем.

Многолетний опыт двигателестроения показывает, что чугун является наиболее приемлемым материалом для изготовления цилиндрических втулок мощных судовых дизелей, гильз цилиндров автотракторных двигателей, поршневых колец. Для повышения механических свойств и износостойкости толстостенных отливок цилиндров (гильз)

при работе в тяжелых условиях эксплуатации наиболее рационально использовать комплексное легирование чугуна фосфором, титаном, ванадием и медью.

5.2. Графитизированные стали

По химическому составу, структуре и механическим свойствам графитизированные стали (ГС) представляют собой промежуточный материал между инструментальными сталями и чугунами с компактными формами графита. В условиях изнашивания при трении включения графита, несмотря на снижение твердости и прочности стали, повышают износостойкость, выполняя функцию смазочного материала. ГС рассматриваются как конструкционный и инструментальный материал с антифрикционными свойствами благодаря некоторому количеству графита. Они достаточно дешевы, т. к. не имеют в составе дорогих легирующих элементов, технологичны при изготовлении изделий и их обработке, надежны и долговечны в эксплуатации. Поэтому в тех случаях, когда высокие давления при трении не связаны с ударными нагрузками, износостойкость может быть обеспечена графитизированными сталями. К ним относятся заэвтектоидные углеродистые или низколегированные стали, в которых часть углерода посредством графитизирующей термической обработки выделена в виде графита (рис. 5.6).

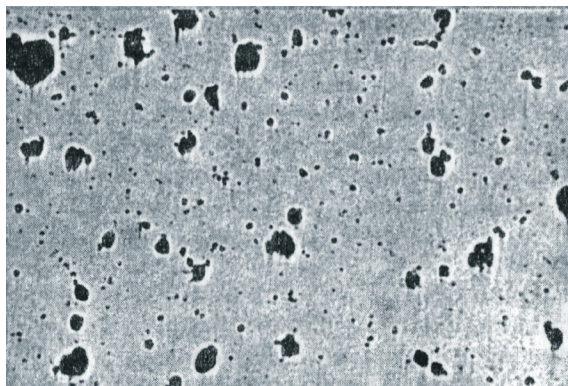


Рис. 5.6. Выделение графита в стали 160СЛ после графитизирующего отжига при 960 °С, x200

Кроме высоких антифрикционных характеристик и износостойкости при трении скольжения, эти стали имеют хорошую демпфирующую способность и циклическую прочность.

Химический состав и назначение графитизированных сталей

Опыт производства и использования ГС позволяет регламентировать существующие комбинации их состава по трем основным группам (табл. 5.4). Они содержат повышенное содержание кремния в количестве 0,7–2,5 %, который выполняет функцию основного графитизатора при отжиге. Медь, никель и алюминий также способствуют графитизации, поэтому для ускорения процесса графитизации ГС иногда дополнительно легируют этими элементами. Хром препятствует графитизации, поэтому его содержание в сталях ограничено. Полное представление о влиянии химического состава, технологии выплавки и отливки, термической обработки на формирование структуры отливок из ГС и их литейные, механические и эксплуатационные свойства можно получить из монографии Р. П. Тодорова и М. В. Николова «Структура и свойства отливок из графитизированных сталей» (М. : Металлургия, 1976. 168 с.).

Химический состав применяемых в промышленности ГС представлен в табл. 5.4. Марганец, никель и молибден увеличивают прокаливаемость, и следовательно, прочность, а титан и молибден как карбидообразующие элементы уменьшают величину зерна.

Таблица 5.4

Химический состав основных групп ГС

Группа ГС	Рекомендуемое содержание элементов, %				
	C	Si	Mn	S	Cr
I — ГС с повышенными пластическими свойствами	1,30–1,65	0,75–1,35	0,3–0,5	≤0,03	≤0,04
II — высококремнистые ГС	1,30–1,55	1,6–2,5	0,3–0,5	≤0,1	≤0,07
III — легированные ГС	1,33–1,50	1,2–1,5	0,8–1,2	≤0,1	≤0,35

Часто используют обозначение ГС по содержанию основных элементов, например указанные в табл. 5.5 стали обозначают как 160СЛ и 140СТЛ соответственно.

В условиях усталостного и адгезионного изнашивания включения графита, несмотря на снижение твердости и прочности стали, повышают износостойкость, выполняя функцию смазочного материала.

Таблица 5.5

**Химический состав графитизированных сталей
с повышенными пластическими свойствами**

Сталь	C	Si	Mn	Cu	Ti	Ni	Cr	S	P
								не более	
ЭИ293	1,50—1,65	0,75—0,90	0,20—0,40	—	—	<0,20	≤0,08	0,03	0,03
ЭИ336	1,30—1,45	1,00—1,25	0,30—0,50	0,40—0,60	0,10—0,30	<0,20	≤0,08	0,025	0,03

ГС рассматриваются как конструкционный и инструментальный материал с антифрикционными свойствами благодаря некоторому количеству графита. Они достаточно дешевы, т. к. не имеют в составе дорогих легирующих элементов, технологичны при изготовлении изделий и их обработке, надежны и долговечны в эксплуатации.

В зависимости от назначения различают два основных вида термической обработки графитизированных сталей — отжиг и закалка с отпуском. В закаленном состоянии их применяют для изготовления формообразующих штампов для холодной штамповки, волоочильного инструмента, ножей, бил, шаров и бронефутеровочных плит угольных мельниц, кожухов и лопастей дробеструйных аппаратов, сопел пескоструйных аппаратов, валков для холодной прокатки.

После отжига эти стали используют в качестве антифрикционного и конструкционного материала для производства вкладышей подшипников скольжения, поршневых колец, тормозных колодок и барабанов, корпусов редукторов и насосов, магнитопроводящих изделий и др.

5.3. Металлокерамические и неметаллические материалы

Особую группу антифрикционных материалов представляют металлокерамические порошковые сплавы, состоящие из металла и графита. Для изготовления подшипников скольжения, втулок, уплотнений, подпятников наряду с литыми сплавами (бронзы, баббиты,

алюминиевые сплавы и чугуны) часто используют антифрикционные металлокерамические сплавы.

Их получают методами порошковой металлургии — прессованием и спеканием порошков бронзы или железа с графитом (1–4 %), бисульфидом молибдена и другими веществами в качестве твердой смазки, что обеспечивает им заданные эксплуатационные свойства. Различают пористые и компактные металлокерамические материалы. В пористых материалах для подшипников скольжения поры занимают 15–30 % объема. После спекания сплавы пропитывают минеральными маслами, смазками или маслографитовой эмульсией. Основные преимущества этих сплавов в сравнении с обычными антифрикционными материалами — хорошая прирабатываемость к валу, а наличие смазки в порах (эффект самосмазывания) способствует снижению коэффициента трения и износа подшипника. Их износостойкость значительно выше, чем у бронз и баббитов. Они работают при более высоких скоростях и давлениях. Наличие в структуре пористости, регулируемой в широких пределах, позволяет предварительно пропитывать их смазочными маслами. Во время работы по мере нагревания масло, удерживаемое в порах и мельчайших каналах материала капиллярными силами, постепенно вытесняется наружу и образует смазочную пленку на рабочей поверхности. При остановке и последующем охлаждении подшипника масло частично всасывается обратно в поры. Поэтому пористые подшипники могут работать длительное время без дополнительной смазки. Эффект самосмазываемости в пропитанных маслом пористых подшипниках без подвода смазки извне может сохраняться в течение 3000–5000 ч, что позволяет изготавливать из них подшипники скольжения во многих случаях без применения принудительной смазки. Наиболее известны железографит и бронзографит. Железографит содержит 95–98 % железа, 2–5 % графита и имеет пористость 15–30 %.

Антифрикционные материалы на основе железа с добавкой графита в зависимости от технологии изготовления могут содержать как свободный, так и связанный углерод, поэтому они имеют ферритную, ферритно-перлитную или перлитно-цементитную структуры (рис. 5.7).

Антифрикционные изделия со структурой феррита и графита обладают меньшей твердостью и лучшей прирабатываемостью, однако непригодны для работы при высоких нагрузках (табл. 5.6). Антифрикционные изделия на железной основе могут эксплуатироваться при нагреве до 200 °С без изменения свойств.

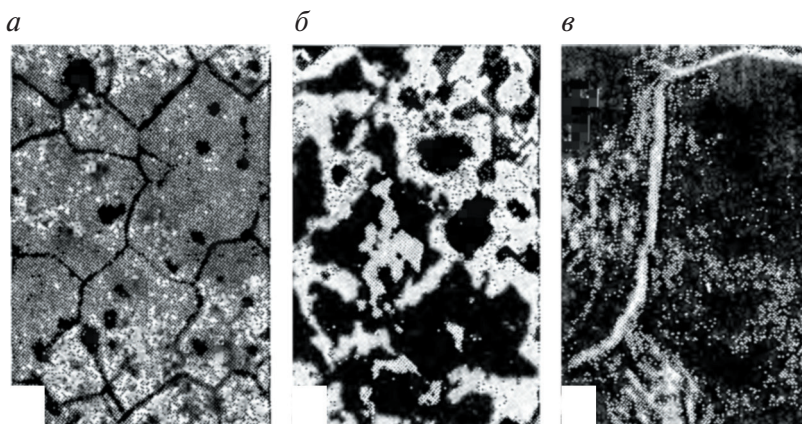


Рис. 5.7 Микроструктуры железографита (x400):

a — ферритная; *б* — ферритно-перлитная; *в* — перлитно-цементитная

Таблица 5.6

Свойства антифрикционных металлокерамических материалов на основе Fe

Структура железографита	Пористость, %	Плотность, г/см ³	σ_B , МН/м ²	НВ, МН/м ²
Ферритная	14	6,1	110–160	370–400
Ферритно-перлитная	22	5,8	160–190	650–700
Перлитно-цементитная	22	5,8	309	647

Бронзографит — это композиция из бронзы (медь — основа, олово или свинец 8,5–10,0 %) и частиц графита (1,5–4,0 %), равномерно распределенных между кристаллами металла. Втулки из бронзографита применяют при средних давлениях и скоростях вращения вала и для узлов с затрудненным доступом смазки, поскольку такие узлы становятся самосмазывающимися. Низкая динамическая прочность не позволяет использовать их при ударных нагрузках.

Композиции на основе алюминия применяют для работы в агрессивных средах, где требуется повышенная коррозионная стойкость. Сплавы этой группы, кроме алюминиевой основы, содержат до 7 % олова или 15–40 % свинца, или же 5–10 % соединений Al_3Fe , Al_5Mn , $CuMg_2$.

Технологии изготовления композиционных антифрикционных порошковых материалов обеспечивают равномерное распределение включений из веществ, играющих роль твердой смазки. Сочетание повышенных антифрикционных свойств твердых смазок и пластмасс

со свойствами металлов позволяет получать материалы, способные работать в воде, агрессивных жидкостях, бензине, различных газовых средах, в вакууме, а также в условиях высоких и низких температур. Порошковые антифрикционные материалы могут представлять собой каркасные конструкции, в которых каркас выполнен из прочного материала, а промежутки заполнены более мягким материалом. Можно, наоборот, получить мягкую матрицу с равномерно распределенными твердыми включениями разной степени дисперсности, повышающими работоспособность подшипников. Такие особенности позволяют осуществлять направленное регулирование свойств порошковых антифрикционных материалов применительно к конкретным условиям эксплуатации.

Внедрение порошковых подшипников скольжения повышает надежность и долговечность работающего оборудования, снижает трудоемкость процесса их изготовления, позволяет уменьшить отходы металла в стружку, обеспечивает экономию дефицитных цветных металлов и сплавов.

Подшипники из неметаллических материалов применяют в тех случаях, когда не может быть химического сродства с материалом вала, но должна быть хорошая прирабатываемость, когда образуются мягкие продукты износа, имеется возможность эффективной смазки водой или рабочей жидкостью (перекачиваемой погружным насосом). Неметаллические материалы, используемые для подшипников, — это пластмассы, твердые породы дерева (дуб, самшит, бокаут и др.), прессованная древесина (лигностон), резина и графит. Особенностью большинства неметаллических- подшипниковых материалов является их низкая теплопроводность и поэтому наиболее подходящей смазкой является вода (рабочая жидкость), одновременно служащая охлаждающей средой.

Хорошо себя зарекомендовали подшипники с пористым бронзовым поверхностным слоем на стальной основе, пропитанные фторопластом-4 и свинцом, с добавками графита и бисульфида молибдена. Такие подшипники имеют высокие антифрикционные свойства, самосмазываемость и способны работать в широком диапазоне температур. Хорошо работают текстолитовые подшипники и подшипники из прессованной древесины (рабочими являются торцовые поверхности). Их применяют в тяжелых машинах — шаровых мельницах, блюмингах и крупных сортовых прокатных станах горячей прокат-

ки. Долговечность таких подшипников больше, чем бронзовых. Капроновые подшипники имеют хорошие антифрикционные свойства, а скорость их изнашивания в 3—4 раза ниже бронзовых. Резиновые подшипники (подшипники Гудрича) успешно работают в качестве опоры гребного вала катеров, находящихся в воде.

Антифрикционные металлокерамические порошковые сплавы используют для изготовления подшипниковых втулок, применяемых в различных отраслях промышленности (автомобильной, станкостроительной, авиационной и т. д.). Например, в конструкции агрегатов автомобильных двигателей используется несколько десятков деталей из металлокерамических материалов (медно-графитовые щетки генератора и стартера, втулки вала якоря стартера, вала привода распределителя зажигания и др.).

Библиографический список

.....

1. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. Москва : Физматгиз, 1963. — 472 с.
2. Богачев И. Н. Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин / И. Н. Богачев, Р. И. Минц. — Москва : Машиностроение, 1964. — 144 с.
3. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. — Москва : Машиностроение, 1968. — 543 с.
4. Гаркунов Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. — Москва : Машиностроение, 1989. — 328 с. — ISBN 5-217-00348-0.
5. Коршунов Л. Г. Испытания металлов на износостойкость при трении / Л. Г. Коршунов // Металловедение и термическая обработка стали / под ред. М. Л. Бернштейна и А. Г. Рахштадта. — Москва : Металлургия, 1991. — Т. 1, кн 2. — С. 387–413. — ISBN 5-229-00796-6.
6. Костецкий Б. И. Трение, износ и смазка в машинах / Б. И. Костецкий. — Киев : Техника, 1970. — 390 с.
7. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. — Москва : Машиностроение, 1968. — 480 с.
8. Любарский И. М., Палатник Л. С. Металлофизика трения / И. М. Любарский, Л. С. Палатник. — Москва : Металлургия, 1976. — 176 с.
9. Материаловедение / под ред. Б. Н. Арзамасова. — Москва : Машиностроение, 2000. — 384 с. — ISBN 57038-1860-5.
10. Машиностроение. Энциклопедия. Т. II-2. Стали. Чугуны. — Москва : Машиностроение, 2001. — 778 с. — ISBN 5-217-02816-5.
11. Сорокин Г. М. Трибология сталей и сплавов / Г. М. Сорокин. — Москва : Недра, 2000. — 317 с. — ISBN 5-247-03838-X.
12. Терентьев В. Ф. Триботехническое материаловедение / В. Ф. Терентьев. — Красноярск, 2000. — 290 с. — ISBN 5-7636-0329-6.

-
13. Тодоров Р. П. Структура и свойства отливок из графитизированных сталей / Р. П. Тодоров, М. В. Николов. — Москва : Металлургия, 1976. — 168 с.
 14. Трибология. Исследования и приложения: Опыт США и стран СНГ / под ред. В. А. Белого, К. Лудемы, Н. К. Мышкина. — Москва : Машиностроение ; Нью-Йорк : Аллертон пресс, 1993. — 454 с. ISBN 5-217-00975-6.
 15. Филиппов М. А. Износостойкие стали для отливок / М. А. Филиппов, А. А. Филиппенков, Г. Н. Плотников. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. — 358 с. — ISBN 978-5-321-01473-8.
 16. Филиппов М. А. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении. Т. II. Цветные металлы и сплавы / М. А. Филиппов, В. Р. Бараз, М. А. Гервасьев. — Екатеринбург : УрФУ, 2013. — 236 с.
 17. Хрущов М. М. Абразивное изнашивание / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. — М.: Наука, 1970. 170 с.

Приложение

Контрольные тесты по трению, износу и антифрикционным материалам

1. Виды трения и изнашивания

Вариант № 1

1. При каком режиме трения наблюдается наименьший коэффициент трения?
 - а) при сухом трении;
 - б) при граничном трении;
 - в) при жидкостном трении.

2. Какому процессу на поверхности трения соответствует следующее определение: образование ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании?
 - а) задир;
 - б) отслаивание;
 - в) изнашивание при фреттинге;
 - г) выкрашивание;
 - д) эрозионное изнашивание;
 - е) царапание;
 - ж) изнашивание при фреттинг-коррозии;
 - з) заедание.

3. Какое из определений соответствует разрушению при заедании?
 - а) образование ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании;
 - б) образование углублений на поверхности в направлении скольжения при воздействии выступов твердых тел или твердых частиц;

- в) отделение с поверхности трения материала в форме чешуек при усталостном изнашивании;
- г) повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких полос в направлении скольжения;
- д) процесс возникновения и развития повреждений поверхности трения вследствие схватывания и переноса материала.

Вариант № 2

1. Какое количество циклов способны выдержать металлы при пластическом оттеснении материала в процессе трения?

- а) $n \rightarrow \infty$;
- б) $n < 10^5$;
- в) $n = 1$.

2. Какое из определений соответствует разрушению при царапании?

- а) образование ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании;
- б) образование углублений на поверхности в направлении скольжения при воздействии выступов твердых тел или твердых части;
- в) отделение с поверхности трения материала в форме чешуек при усталостном изнашивании;
- г) повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких полос в направлении скольжения.

3. Какое из определений соответствует газоабразивному изнашиванию?

- а) механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает высокие ударные давления или высокую температуру;
- б) механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательных относительных перемещениях;
- в) изнашивание поверхности в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа;

- г) механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц;
- д) механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхности.

Вариант № 3

- 1. Какой вид нарушения фрикционных связей на поверхности изнашивания имел место, если разрушение произошло за 10^4 циклов?**
 - а) пластическое отеснение материала;
 - б) микрорезание;
 - в) упругое отеснение материала;
 - г) схватывание пленок;
 - д) схватывание и вырывание металла.
- 2. Какому процессу на поверхности трения соответствует следующее определение: процесс возникновения и развития повреждений поверхности трения вследствие схватывания и переноса материала?**
 - а) задир;
 - б) отслаивание;
 - в) изнашивание при фреттинге;
 - г) выкрашивание;
 - д) эрозионное изнашивание;
 - е) царапание;
 - ж) изнашивание при фреттинг-коррозии;
 - з) заедание.
- 3. Какое из определений соответствует газоабразивному изнашиванию?**
 - а) механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает высокие ударные давления или высокую температуру;
 - б) механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательных относительных перемещениях;

- в) изнашивание поверхности в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа;
- г) механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц;
- д) механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхности.

Вариант № 4

1. Какой вид нарушения фрикционных связей на поверхности изнашивания имел место, если разрушение произошло за 1 цикл?

- а) пластическое отеснение материала;
- б) микрорезание;
- в) упругое отеснение материала;
- г) схватывание пленок.

2. Какое из определений соответствует кавитационному изнашиванию?

- а) механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает высокие ударные давления или высокую температуру;
- б) механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательных относительных перемещениях;
- в) изнашивание поверхности в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа;
- г) механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц;
- д) механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхности.

3. Какому процессу на поверхности трения соответствует следующее определение: повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких полос в направлении скольжения?

- а) задир;
- б) отслаивание;
- в) изнашивание при фреттинге;
- г) выкрашивание;
- д) эрозионное изнашивание;
- е) царапание;
- ж) изнашивание при фреттинг-коррозии;
- з) заедание.

Вариант № 5

1. Какой вид нарушения фрикционных связей на поверхности изнашивания имел место, если разрушение произошло за 10^7 циклов?

- а) пластическое отеснение материала;
- б) микрорезание;
- в) упругое отеснение материала;
- г) схватывание и вырывание металла.

2. Какое из определений соответствует усталостному изнашиванию?

- а) механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает высокие ударные давления или высокую температуру;
- б) механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательных относительных перемещениях;
- в) изнашивание поверхности в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа;
- г) механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц;
- д) механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхности.

3. Какое количество циклов способны выдержать металлы при упругом оттеснении материала в процессе трения?

- а) $n \rightarrow \infty$;
- б) $n < 10^5$;
- в) $n = 1$.

Вариант № 6

1. Какой вид нарушения фрикционных связей на поверхности изнашивания имел место, если разрушение произошло за 10^7 циклов?

- а) пластическое оттеснение материала;
- б) микрорезание;
- в) схватывание пленок;
- г) схватывание и вырывание металла.

2. Какой вид изнашивания реализуется в быстротекущем потоке жидкости?

- а) усталостное;
- б) изнашивание при фреттинге;
- в) кавитационное;
- г) эрозионное;
- д) изнашивание при фреттинг-коррозии.

3. Какое из определений соответствует абразивному изнашиванию?

- а) механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает высокие ударные давления или высокую температуру;
- б) механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательных относительных перемещениях;
- в) изнашивание поверхности в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа;
- г) механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц;

- д) механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхности.

Вариант № 7

1. Какой вид нарушения фрикционных связей на поверхности изнашивания имел место, если разрушение произошло за 1 цикл?

- а) пластическое оттеснение материала;
- б) упругое оттеснение материала;
- в) схватывание пленок;
- г) схватывание и вырывание металла.

2. Как определить интенсивность изнашивания?

- а) отношение потерь массы ко времени изнашивания;
- б) отношение потерь массы к пути трения;
- в) отношение потерь массы к произведению плотности материала на длину пути и площадь поверхности контакта.

3. Какое из определений соответствует абразивному изнашиванию?

- а) механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает высокие ударные давления или высокую температуру;
- б) механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательных относительных перемещениях;
- в) изнашивание поверхности в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа;
- г) механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц;
- д) механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхности.

Вариант № 8

- 1. При каком условии происходит нормальный режим трения и изнашивания?**
 - а) $d\tau/dh > 0$ — положительный градиент механических свойств от поверхности;
 - б) $d\tau/dh < 0$ — отрицательный градиент механических свойств от поверхности;
 - в) $d\tau/dh = 0$ — нейтральный градиент механических свойств от поверхности.
- 2. Как определить интенсивность изнашивания?**
 - а) отношение потерь массы ко времени изнашивания;
 - б) отношение потерь массы к пути трения;
 - в) отношение потерь массы к произведению плотности материала на длину пути и площадь поверхности контакта.
- 3. За сколько циклов воздействия происходит разрушение при установившемся изнашивании?**
 - а) за 10 циклов;
 - б) за 100000 циклов;
 - в) за 1 цикл;
 - г) за 100 циклов.

Вариант № 9

- 1. При каком условии происходит разрушение за 1 цикл?**
 - а) $d\tau/dh > 0$ — положительный градиент механических свойств от поверхности;
 - б) $d\tau/dh < 0$ — отрицательный градиент механических свойств от поверхности;
 - в) $d\tau/dh = 0$ — нейтральный градиент механических свойств от поверхности.
- 2. Какое из определений соответствует усталостному изнашиванию?**
 - а) механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захло-

- пываются вблизи поверхности, что создает высокие ударные давления или высокую температуру;
- б) механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательных относительных перемещениях;
- в) изнашивание поверхности в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа;
- г) механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц;
- д) механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхности.

3. Какому виду изнашивания соответствует следующее определение: механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает высокие ударные давления или высокую температуру?

- а) усталостное;
- б) гидроэрозионное;
- в) изнашивание при фреттинге;
- г) кавитационное;
- д) эрозионное;
- е) гидроабразивное.

Вариант № 10

1. На какой стадии изнашивания наблюдается минимальный коэффициент трения?

- а) на стадии приработки;
- б) на стадии установившегося изнашивания;
- в) на стадии катастрофического разрушения.

2. Какому виду изнашивания соответствует следующее определение: Механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении?

- а) усталостное;
- б) абразивное;
- в) изнашивание при фреттинге;
- г) кавитационное;
- д) эрозионное.

3. Какое из определений соответствует разрушению при выкрашивании?

- а) механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает высокие ударные давления или высокую температуру;
- б) механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательных относительных перемещениях;
- в) изнашивание поверхности в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа;
- г) механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц;
- д) механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхности.

2. Абразивное изнашивание и износостойкие материалы

Вариант № 1

1. Детали из разных сталей обработаны на равную твердость HB 500. Какая из них будет более износостойкой при абразивном изнашивании?

- а) Сталь 40;
- б) У10;
- в) Х12;
- г) 60;
- д) ШХ15;
- е) У8.

2. Детали из какой стали после закалки обладают минимальной износостойкостью при абразивном изнашивании?
 - а) 20Х;
 - б) 30;
 - в) Х;
 - г) 40ХН;
 - д) ШХ15;
 - е) Х12;
 - ж) У10.

3. Какое из определений соответствует абразивному изнашиванию?
 - а) механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательных относительных перемещениях;
 - б) изнашивание поверхности в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа;
 - в) механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц.

4. Какому отпуску подвергаются углеродистые инструментальные стали после закалки?
 - а) низкому;
 - б) среднему;
 - в) высокому.

Вариант № 2

1. Как изменяется величина износа при увеличении отношения $HВ_а/HВ_м$ свыше 1,7 ($HВ_а$ — твердость абразива, $HВ_м$ — твердость металла)?
 - а) увеличивается;
 - б) не изменяется;
 - в) уменьшается.

2. Детали из какой стали после закалки обладают максимальной износостойкостью при абразивном изнашивании?

- а) Сталь 40;
- б) У10;
- в) Х12;
- г) 60;
- д) ШХ15;
- е) У8.

3. Какой вид изнашивания считается допустимым?

- а) абразивное;
- б) окислительное;
- в) эрозийное.

4. Для какой операции термообработки температура нагрева заэвтектоидных сталей является максимальной?

- а) закалки;
- б) отпуска;
- в) нормализации.

Вариант № 3

1. Как изменяется величина износа при уменьшении отношения $HВ_a/HВ_m$ менее 0,7 ($HВ_a$ — твердость абразива, $HВ_m$ — твердость металла)?

- а) увеличивается;
- б) не изменяется;
- в) уменьшается.

2. Детали из какой стали после закалки обладают минимальной износостойкостью при абразивном изнашивании?

- а) Сталь 40;
- б) У10;
- в) Х12;
- г) 60;
- д) ШХ15;
- е) У8.

- 3. Какому виду изнашивания соответствует следующее определение: механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц?**
- а) усталостное;
 - б) абразивное;
 - в) изнашивание при фреттинге;
 - г) кавитационное;
 - д) эрозионное.
- 4. Какую сталь для цементируемых шестерен можно предложить из нижеперечисленного ряда?**
- а) 20Х;
 - б) 40Х;
 - в) 38ХС;
 - г) 38ХМЮА.

Вариант № 4

- 1. Как изменяется величина износа при увеличении отношения $HВ_а/HВ_м$ в интервале 1,0–1,5 ($HВ_а$ — твердость абразива, $HВ_м$ — твердость металла)?**
- а) увеличивается прямо пропорционально;
 - б) не изменяется;
 - в) уменьшается.
- 2. Детали из какой стали в отожженном состоянии обладают минимальной износостойкостью при абразивном изнашивании?**
- а) Сталь 40;
 - б) У10;
 - в) Х12;
 - г) 60;
 - д) ШХ15;
 - е) У8.
- 3. Какой вид нарушения фрикционных связей на поверхности изнашивания имел место, если разрушение произошло за 1 цикл?**
- а) пластическое оттеснение материала;

- б) микрорезание;
- в) упругое оттеснение материала.

- 4. Какую сталь целесообразно использовать для изготовления теплостойкого режущего инструмента?**
- а) Р6М5;
 - б) У12;
 - в) 5ХНМ;
 - г) 7ХФ.

Вариант № 5

- 1. При каком изменении отношения HV_a/HV_m величина износа увеличивается прямо пропорционально (HV_a — твердость абразива, HV_m — твердость металла)?**
- а) HV_a/HV_m находится в интервале 1,0–1,5;
 - б) $HV_a/HV_m < 0,7–1,1$;
 - в) $HV_a/HV_m > 1,3–1,7$.
- 2. Детали из какой стали в отожженном состоянии обладают максимальной износостойкостью при абразивном изнашивании?**
- а) Сталь 40;
 - б) У10;
 - в) Х12;
 - г) 60;
 - д) ШХ15.
- 3. Какой вид изнашивания считается допустимым?**
- а) абразивное;
 - б) окислительное;
 - в) эрозионное.
- 4. Из какой стали целесообразно изготовить кухонный нож?**
- а) Ст3кп;
 - б) У8;
 - в) 20Х2Н4А;
 - г) 30ХФ.

Вариант № 6

1. При каком изменении отношения $HВ_a/HВ_m$ величина износа имеет конечную и постоянную величину ($HВ_a$ — твердость абразива, $HВ_m$ — твердость металла)?
 - а) $HВ_a/HВ_m$ находится в интервале 1,0–1,5;
 - б) $HВ_a/HВ_m < 0,7$ –1,1;
 - в) $HВ_a/HВ_m > 1,3$ –1,7.

2. Какие стали из числа перечисленных (20Х; 30, Х; 40ХН, Х12, У10) являются стойкими при абразивном изнашивании?
 - а) все, кроме Х;
 - б) 20Х, 30, Х и 40ХН;
 - в) Х12, 20Х и 40ХН;
 - г) Х12, У10 и Х.

3. Какое из определений соответствует разрушению при царапании?
 - а) образование ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании;
 - б) образование углублений на поверхности в направлении скольжения при воздействии выступов твердых тел или твердых частиц;
 - в) отделение с поверхности трения материала в форме чешуек при усталостном изнашивании;
 - г) повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких полос в направлении скольжения.

4. Какие стали из перечисленных марок (У12, 45, Р6М5, 30ХГС, 40ХНМ, ХВГ) являются инструментальными?
 - а) Р6М5, 30ХГС, 40ХНМ;
 - б) 30ХГС, 40ХНМ;
 - в) У12, Р6М5, ХВГ.

Вариант № 7

1. Какая сталь из перечисленных (20Х; 30, Х; 40ХН, ШХ15, Х12, У10) является наиболее износостойкой?

- а) 20X;
 - б) 30;
 - в) X;
 - г) 40XH;
 - д) ШХ15;
 - е) Х12;
 - ж) У10.
- 2. Какому виду изнашивания соответствует определение: образование углублений на поверхности в направлении скольжения при воздействии выступов твердых тел или твердых частиц?**
- а) абразивное;
 - б) усталостное;
 - в) эрозионное;
 - г) кавитационное.
- 3. Какой вид нарушения фрикционных связей на поверхности изнашивания имел место, если разрушение произошло за 1 цикл?**
- а) пластическое отеснение материала;
 - б) микрорезание;
 - в) упругое отеснение материала.
- 4. Чем обеспечивается закаливаемость стали?**
- а) большим количеством легирующих элементов;
 - б) высоким содержанием углерода;
 - в) высокой устойчивостью переохлажденного аустенита.

Вариант № 8

- 1. При каком способе химико-термической обработки износостойкость сохраняется при температурах работы до 500 °С?**
- а) при азотировании;
 - б) при цементации;
 - в) при нитроцементации.
- 2. Какой вид изнашивания считается допустимым?**
- а) абразивное;

- б) окислительное;
 - в) эрозионное.
- 3. Какая из перечисленных сталей в закаленном состоянии (20X, 30X, X, 40XH, ШХ15, Х12, У10) является наименее износостойкой?**
- а) 20X;
 - б) 30X;
 - в) X;
 - г) 40XH;
 - д) ШХ15;
 - е) Х12;
 - ж) У10.
- 4. Какой вид нарушения фрикционных связей на поверхности изнашивания имел место, если разрушение произошло за 10^4 циклов?**
- а) пластическое отеснение материала;
 - б) микрорезание;
 - в) упругое отеснение материала.

Вариант № 9

- 1. При каком способе химико-термической обработки поверхность приобретает повышенную коррозионную стойкость?**
- а) при азотировании;
 - б) при цементации;
 - в) при нитроцементации.
- 2. При каком изменении отношения HV_a/HV_m величина износа имеет конечную и постоянную величину (HV_a — твердость абразива, HV_m — твердость металла)?**
- а) HV_a/HV_m находится в интервале 1,0–1,5;
 - б) $HV_a/HV_m < 0,7–1,1$;
 - в) $HV_a/HV_m > 1,3–1,7$.

- 3. Детали из какой стали в отожженном состоянии обладают максимальной износостойкостью при абразивном изнашивании?**
- а) Х12;
 - б) У10;
 - в) Сталь 40;
 - г) 60;
 - д) ШХ15.
- 4. Какой вид нарушения фрикционных связей на поверхности изнашивания имел место, если разрушение произошло за 1 цикл?**
- а) пластическое отеснение материала;
 - б) царапание;
 - в) упругое отеснение материала.

3. Антифрикционные сплавы

Вариант № 1

- 1. Какой из сплавов относится к свинцовистым баббитам?**
- а) Б16;
 - б) БК;
 - в) Б83.
- 2. Какой из сплавов имеет максимальный коэффициент трения?**
- а) Б88;
 - б) Л90;
 - в) Бр010Ф1.
- 3. Какой сплав по структуре отвечает принципу: твердая матрица и мягкие включения?**
- а) Бр010 Ф1;
 - б) БрС30;
 - в) Б83.

Вариант № 2

- 1. Какой из сплавов относится к свинцово-оловянистым баббитам?**
 - а) Б16;
 - б) БК;
 - в) Б83;
 - г) Б88.
- 2. Какой из сплавов имеет минимальный коэффициент трения?**
 - а) Б83;
 - б) Бр010Ф1;
 - в) ЛЦ16К4.
- 3. Какой сплав по структуре отвечает принципу: мягкая матрица и твердые включения?**
 - а) БрС30;
 - б) БрО5Ц5;
 - в) Б88.

Вариант № 3

- 1. Укажите правильную принадлежность латуни к конкретной системе: Cu-Zn, Cu-Sn, Cu-Ni, Al-Si.**
- 2. Какой из сплавов относится к оловянистым баббитам?**
 - а) Б16;
 - б) БК;
 - в) Б83;
 - г) БН.
- 3. Какой сплав по структуре отвечает принципу: твердая матрица и мягкие включения?**
 - а) БрС30;
 - б) Б83;
 - в) БрО5Ц5;
 - г) ЛЦ16К4.

Вариант № 4

- 1. Какой из сплавов имеет максимальный коэффициент трения?**
 - а) Б88;
 - б) ЛЦ16К4;
 - в) Бр010Ф1.

- 2. С какой целью оловянистые баббиты легируют медью?**
 - а) для повышения коррозионной стойкости;
 - б) для уменьшения коэффициента трения;
 - в) для предупреждения ликвации по удельному весу.

- 3. К какой группе относится сплав Б16?**
 - а) к свинцовооловянным баббитам;
 - б) к алюминиевым бронзам;
 - в) к оловянистым баббитам.

Вариант № 5

- 1. Какой сплав по структуре отвечает принципу: мягкая матрица и твердые включения?**
 - а) БрС30;
 - б) Б83;
 - в) БрО5Ц5;
 - г) ЛЦ16К4.

- 2. Какой сплав имеет максимальный коэффициент трения?**
 - а) Б88;
 - б) Л90;
 - в) Бр010Ф1.

- 3. Какой из медных сплавов имеет минимальный коэффициент трения?**
 - а) БрАЖ9-4;
 - б) ЛЦ38Мц2;
 - в) Бр010Ф1;
 - г) ЛЦ16К4.

Вариант № 6

- 1. Какой сплав по структуре отвечает принципу: твердая матрица и мягкие включения?**
 - а) Бр010Ф1;
 - б) Б83;
 - в) БрО5Ц5;
 - г) ЛЦ16К4;
 - д) БрС30.
- 2. Какой из сплавов имеет минимальный коэффициент трения?**
 - а) Б88;
 - б) ЛЦ16К4;
 - в) Бр010Ф1.
- 3. Какой сплав является кремнистой бронзой?**
 - а) БрОЦ4-3;
 - б) БрАЖ9-4;
 - в) БрКМц3-1;
 - г) БрБ2.

Вариант № 7

- 1. Какой сплав имеет минимальный коэффициент трения?**
 - а) БрАЖ9-4;
 - б) ЛЦ38Мц2;
 - в) Бр010Ф1;
 - г) ЛЦ16К4.
- 2. Какой сплав по структуре отвечает принципу: мягкая матрица и твердые включения?**
 - а) Бр010Ф1;
 - б) БрС30.
- 3. К какой группе относится сплав Б6?**
 - а) свинцовистым баббитами;
 - б) к алюминиевым бронзам;
 - в) к оловянистым баббитами.

Вариант № 8

- 1. Какой сплав является оловянной бронзой?**
 - а) БрОЦ4-3;
 - б) БрАЖ9-4;
 - в) БрКМц3-1;
 - г) БрБ2.

- 2. Какой из сплавов имеет минимальный коэффициент трения?**
 - а) Б83;
 - б) БрАЖ9-4;
 - в) ЛЦ16К4.

- 3. К какой группе относится сплав Б83?**
 - а) свинцовистым баббитами;
 - б) к алюминиевым бронзам;
 - в) к оловянистым баббитами.

Вариант № 9

- 1. Какой сплав по структуре отвечает принципу: твердая матрица и мягкие включения?**
 - а) БрС30;
 - б) Б83;
 - в) БрО5Ц5;
 - г) ЛЦ16К4.

- 2. Какой из медных сплавов имеет минимальный коэффициент трения?**
 - а) БрАЖ9-4;
 - б) ЛЦ38Мц2;
 - в) Бр010Ф1;
 - г) ЛЦ16К4.

- 3. С какой целью оловянистые баббиты легируют медью?**
 - а) для повышения коррозионной стойкости;
 - б) для уменьшения коэффициента трения;
 - в) для предупреждения ликвации по удельному весу.

4. Антифрикционные чугуны и графитизированные стали

Вариант № 1

- 1. Какова оптимальная температура 1-й стадии графитизирующего отжига для графитизированных сталей?**
 - а) 700 °С;
 - б) 800 °С;
 - в) 900 °С;
 - г) 1000 °С.

- 2. Какой материал следует выбрать для изготовления вкладышей подшипников скольжения?**
 - а) графитизированную сталь;
 - б) белый износостойкий чугун;
 - в) сталь ШХ15.

- 3. В каком ответе указаны чугуны с одинаковой металлической основой в порядке возрастания прочности при растяжении?**
 - а) серый — ковкий — высокопрочный;
 - б) высокопрочный — ковкий — серый;
 - в) серый высокопрочный — ковкий;
 - г) ковкий — высокопрочный — серый — высокопрочный — ковкий;
 - д) ковкий — высокопрочный — серый.

Вариант № 2

- 1. Какое содержание углерода имеют графитизированные стали?**
 - а) 0,5–0,8 %;
 - б) 1,0–1,3 %;
 - в) 1,3–1,6 %;
 - г) 1,6–2,0 %.

- 2. По какой характеристике можно определить вид чугуна (серый, ковкий, высокопрочный)?**
- а) размеру графитных включений;
 - б) по количеству графитных включений;
 - в) по форме графитных включений;
 - г) по характеру металлической основы.
- 3. В каком ответе указаны чугуны с одинаковой металлической основой в порядке возрастания прочности при растяжении?**
- а) серый — ковкий — высокопрочный;
 - б) высокопрочный — ковкий — серый;
 - в) серый — высокопрочный — ковкий;
 - г) ковкий — высокопрочный — серый.

Вариант № 3

- 1. Какова оптимальная температура 1-й стадии графитизирующего отжига для графитизированных сталей?**
- а) 700 °С;
 - б) 800 °С;
 - в) 900 °С;
 - г) 1000 °С.
- 2. В чем заключается влияние формы графитных включений на пластичность серого чугуна?**
- а) не зависит от формы включений;
 - б) выше при пластинчатом графите;
 - в) выше при шаровидном графите;
 - г) выше при хлопьевидном графите.
- 3. Что обычно используют для изготовления коленчатых валов серийного легкового автомобиля?**
- а) сталь;
 - б) ковкий чугун;
 - в) высокопрочный чугун;
 - г) белый чугун.

Вариант № 4

- 1. С какой целью графитизированные стали легированы кремнием?**
 - а) для предотвращения графитизации;
 - б) для повышения прокаливаемости;
 - в) для улучшения обрабатываемости резанием;
 - г) для облегчения графитизации.
- 2. Каким способом получают чугун с хлопьевидной формой графитных включений?**
 - а) добавлением модификаторов Si и A;
 - б) добавлением модификаторов Mg и Al;
 - в) уменьшением скорости охлаждения при кристаллизации;
 - г) графитизирующим отжигом белого чугуна.
- 3. Какие железоуглеродистые сплавы называют ферритными чугунами?**
 - а) весь углерод (более 2,14 %) находится в виде графита;
 - б) наряду с цементитом имеется феррит;
 - в) структура металлической основы ферритная;
 - г) графит имеет пластинчатую форму.

Вариант № 5

- 1. По каким свойствам графитизированные стали имеют преимущество перед инструментальными сталями?**
 - а) по прочности;
 - б) по износостойкости в условиях абразивного изнашивания;
 - в) вследствие более низкого коэффициента трения.
- 2. Какой материал имеет наибольшую стойкость при абразивном изнашивании?**
 - а) графитизированная сталь;
 - б) белый износостойкий чугун;
 - в) сталь ШХ15.

3. Какие железоуглеродистые сплавы называют ферритными чугунами?

- а) весь углерод (более 2,14 %) находится в виде графита;
- б) наряду с цементитом имеется феррит;
- в) структура металлической основы ферритная;
- г) графит имеет пластинчатую форму.

Вариант № 6

1. Какой материал следует выбрать для изготовления вкладышей подшипников скольжения?

- а) графитизированную сталь;
- б) белый износостойкий чугун;
- в) сталь ШХ15.

2. В каком ответе указаны чугуны с одинаковой металлической основой в порядке возрастания прочности при растяжении?

- а) серый — ковкий — высокопрочный;
- б) высокопрочный — ковкий — серый;
- в) серый — высокопрочный — ковкий;
- г) ковкий — высокопрочный — серый.

3. В каком ответе указаны чугуны с одинаковой металлической основой в порядке возрастания прочности при растяжении?

- а) серый — ковкий — высокопрочный;
- б) высокопрочный — ковкий — серый;
- в) серый — высокопрочный — ковкий;
- г) ковкий — высокопрочный — серый.

Вариант № 7

1. Какой материал имеет наибольшую стойкость при абразивном изнашивании?

- а) графитизированная сталь;
- б) белый износостойкий чугун;
- в) сталь ШХ15.

- 2. По каким свойствам графитизированные стали имеют преимущество перед инструментальными сталями?**
 - а) по прочности;
 - б) по износостойкости в условиях абразивного изнашивания;
 - в) вследствие более низкого коэффициента трения.

- 3. Какой материал следует выбрать для изготовления вкладышей подшипников скольжения?**
 - а) серый чугун;
 - б) белый износостойкий чугун;
 - в) сталь 110Г13Л;
 - г) сталь ШХ15.

Вариант № 8

- 1. По каким свойствам графитизированные стали имеют преимущество перед инструментальными сталями?**
 - а) по прочности;
 - б) по износостойкости в условиях абразивного изнашивания;
 - в) вследствие более низкого коэффициента трения.

- 2. Какой материал следует выбрать для изготовления вкладышей подшипников скольжения?**
 - а) серый чугун;
 - б) белый износостойкий чугун;
 - в) сталь 110Г13Л;
 - г) сталь ШХ15.

Вариант № 9

- 1. Содержание какого элемента необходимо резко ограничивать в графитизированных сталях?**
 - а) никель;
 - б) кремний;
 - в) хром.

- 2. Какой материал имеет наибольшую стойкость при абразивном изнашивании?**
 - а) графитизированная сталь;
 - б) белый износостойкий чугун;
 - в) сталь ШХ15.

- 3. Какой процент связанного углерода содержит ферритный серый чугун?**
 - а) 4,3 %;
 - б) 0 %;
 - в) 2,14 %;
 - г) 0,8 %.

Вариант № 10

- 1. Какое содержание углерода имеют графитизированные стали?**
 - а) 0,5–0,8 %;
 - б) 1,0–1,3 %;
 - в) 1,3–1,6 %;
 - г) 1,6–2,0 %.

- 2. С какой целью графитизированные стали легированы кремнием?**
 - а) для предотвращения графитизации;
 - б) для повышения прокаливаемости;
 - в) для улучшения обрабатываемости резанием;
 - г) для облегчения графитизации.

- 3. Какая форма графита наиболее благоприятна с точки зрения получения высоких механических свойств?**
 - а) грубопластинчатая;
 - б) мелкопластинчатая;
 - в) хлопьевидная;
 - г) шаровидная.

Учебное издание

Филиппов Михаил Александрович
Шешуков Олег Юрьевич

**ТРЕНИЕ
И АНТИФРИКЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

Редактор И. В. Коршунова
Верстка О. П. Игнатъевой

Подписано в печать 12.11.2021. Формат 70×100/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 16,45.
Уч.-изд. л. 12,13. Тираж 30 экз. Заказ 239.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

